

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE
ELECTRIQUE



FILIERE : ELECTROMÉCANIQUE
OPTION : ELECTROMÉCANIQUE

N° : ELM 15

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: CHEBABHI Layachi

LASFER Oussama

THEME

Modélisation d'une machine synchrone à aimant
supraconducteur

Soutenu devant le jury composé de:

Pr. GHEMARI ZINE	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	President
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2021 / 2022

Dédicaces

A nos parents,

A nos frères et nous sœurs

A tous nos amis

A tous nos collègues promotion 2022.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord le DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Nous tenons à remercier sincèrement l'encadreur de ce mémoire Dr **BELKHIRI Salah** pour l'aide précieuse qu'il nous a offert dans de ce travail.*

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer au jury pour juger ce modeste travail.

*A travers ce mémoire, nous adressons nos reconnaissances à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui, en particulier **Dr DEFDAF Mabrouk**.*

Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire.

Résumé

La découverte des matériaux supraconducteurs HTC YBCO et BSCCO a constitué un pas qualitatif dans les domaines industriels en raison des caractéristiques qui les distinguent et de leurs capacités à produire des champs magnétiques intenses, ce qui a permis de les appliquer à des machines tournantes telles que la machine synchrone à aimants supraconducteurs, en raison de leurs performances efficaces de réduire le bruit et les pertes. Il est basé sur l'augmentation du courant électrique dans la partie mobile, ce qui augmente considérablement la densité d'énergie, ce qui signifie la possibilité de réduire la taille de la machine tout en obtenant de meilleures performances, donc en l'utilisant de manière nouvelle et innovante. De plus, l'augmentation du rendement du moteur entraîne des coûts d'exploitation inférieurs à ceux des moteurs conventionnels. Dans ce travail, nous présentons une étude comparative entre les machines synchrones traditionnelle et celles à aimants supraconducteurs sous deux différents logiciels; FLUX2D basé sur la méthode des éléments finis et SIMULINK sous MATLAB.

Mots clés : supraconducteurs HTC, champs magnétiques, la machine synchrone, aimant, les pertes, la densité d'énergie, performance.

ملخص

شكل اكتشاف المواد فائقة التوصيل HTC BSCCO و YBCO خطوة نوعية في المجالات الصناعية بسبب الخصائص التي تميزها وقدرتها على إنتاج مجالات مغناطيسية مكثفة، مما جعل من الممكن تطبيقها على الآلات الدوارة مثل آلة المغناطيس المتزامن فائقة التوصيل بسبب أداؤها الفعال وتقليل الضوضاء والخسائر. يقوم على زيادة التيار الكهربائي في الجزء المتحرك مما يزيد بشكل كبير من كثافة الطاقة مما يعني إمكانية تقليص حجم الماكينة مع الحصول على أداء أفضل. بالإضافة ، تؤدي زيادة كفاءة المحرك إلى انخفاض تكاليف التشغيل مقارنة بالمحركات التقليدية. في هذا العمل ، نقدم دراسة مقارنة بين الآلات المتزامنة ذات المغناطيسات فائقة التوصيل وتلك التي يتم إجراؤها بواسطة برنامجين مختلفين ؛ FLUX2D على أساس طريقة العناصر المحدودة و SIMULINK تحت .MATLAB

الكلمات المفتاحية : الموصلات الفائقة درجة الحرارة الحرجة، المجالات المغناطيسية ، الآلة المتزامنة ، المغناطيس ، الخسائر ، كثافة الطاقة ، الأداء.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles et abréviations	
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux supraconducteurs	
I.1. Introduction	3
I.2. Historie.....	3
I.3. Propriétés des supraconducteurs	5
I.3.1. Résistivité électrique nulle	5
I.3.2. Effet Meissner	6
I.3.3. la Surface critique	8
I.3.4. Théorie BCS	10
I.3.5. Température Critique	11
I.3.6. Champ Magnétique Critique	12
I.3.7. Densité de courant critique $J_c(H,T)$	12
I.4. Types des supraconducteurs	13
I.4.1. Supraconducteurs de type I	13
I.4.2. Supraconducteurs de type II	14

I.5. Matériaux supraconducteurs selon leur température	16
I.5.1. Supraconducteurs à basse température critique (SBTC)	16
I.5.2. Supraconducteurs à haute température critique (SHTC)	17
I.6. Types des Supraconducteurs à haute température critique	18
I.6.1. Supraconducteurs BSCCO	19
I.6.2. Supraconducteurs YBCO	22
I.7. Principales applications des supraconducteurs	23
I.7.1. Machines tournantes	23
I.7.2. Les aimants permanents supraconducteurs	24
I.7.3. Les transformateurs	24
I.7.4. Limitation de courant	24
I.7.5. Câble de transport	25
I.7.6. Stockage d'énergie	25
I.8. Conclusion	26
 CHAPITRE II : Modélisation des matériaux supraconducteurs	
II.1. Introduction	27
II.2. Equation mathématique régissent le phénomène	27
II.2.1 Relation B(H).	27
II.2.1 Relation B(J)	28
II.3. Le modèle de comportement	29
II.3.1. Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean	29
II.3.2. Modèle de KIM	30

II.3.3. Modèle de Flux Flow et Flux Crêpe	31
II.4. Formulation des équations électromagnétiques	32
II.4.1. Modèle électrostatique	32
II.4.2. Modèle magnétostatique	32
II.4.2.1. Modèle magnétostatique scalaire	33
II.4.2.2. Modèle magnétostatique vectorielle.....	33
II.4.3. Modèle magnétodynamique.....	33
II.5. Conclusion	35
 CHAPITRE III : Etude d'une machine synchrone à aimant supraconducteur 	
III.1. Introduction.....	36
III.2. La machine synchrone à aimant permanent (MSAP)	37
III.2.1. Structure de la machine synchrone à aimant permanent	37
III.2.1.1. Le stator:.....	38
III.2.1.2. Le rotor	39
III.2.1.3. Les aimants permanents.....	39
III.3. Machines synchrones supraconductrices.....	41
III.3.1. Principe fonctionnement	41
III.3.2. L'induit	42
III.3.3. L'inducteur	43
III.3.4. Transmission de couple « Torque Tube »	43
III.4. Les aimants supraconducteurs pour la recherche	43
III.5. Les Aimants supraconducteurs	43

III.5.1. Le refroidissement de la pastille sous champ magnétique	44
III.5.2. Le piégeage impulsif	44
III.6. Machines synchrone à aimants supraconducteurs	46
III.7. Modélisation de la MSAP	48
III.7.1. Mise en équations de la machine dans le repère (abc)	48
III.7.1.1. Equations électriques	48
III.7.1.2. Equations magnétiques	48
III.7.1.3. Equation mécanique	49
III.7.2. Transformation De Park	49
III.7.2.1. Equations des tensions et des flux dans référentiel de PARK	50
III.8 MODELISATION ET SIMULATION DE LA MSAP	52
III.8.1. Paramètres de la machine étude	52
III.8.2 Résultats de la simulation	54
III.8.2.1. Les courbes	54
III.8.2.2. Interprétations des résultats	56
III.9. MODELISATION ET SIMULATION PAR FLUX2D	57
III.9.1. Géométrie	58
III.9.2. Création des matériaux	60
III.9.3. Création de circuit	61
III.9.4. Création de maillage	62
III.10 Résultat	63
III.10.1 Résultat graphique	63
III.10.2 Les courbes	66

III.10.3 Interprétations des résultats	70
III.11. Conclusion	71
Conclusion générale.....	72
Références Bibliographiques	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Évolution dans le temps des températures critiques les plus élevées dans chacune des grandes classes de supraconducteurs	5
Figure I.2: Courbe de résistance d'un échantillon de mercure en fonction de la température.....	6
Figure I.3 : Illustrant l'effet de Meissner et la différence entre un supraconducteur et un conducteur parfait	7
Figure I.4: Effet Meissner, lévitation d'un supraconducteur	8
Figure I.5: Surface critique des matériaux supraconducteurs	9
Figure I.6: Illustrant 3 surfaces critiques d'un supraconducteur ($Sc1$, $Sc2$ et $Sc3$) Entre ces surfaces, la supraconductivité apparaît sous différentes formes	9
Figure I.7: La formation d'une paire de cuivre : un électron qui passe attire les ions chargés positivement de le treillis, provoquant une légère ondulation dans son sillage autre électron passant à l'opposé direction est attirée par ce déplacement	10
Figure I.8: Etat normal et supraconducteur d'un métal en fonction de la température.....	11
Figure I.9: Caractéristique champ électrique-densité de courant à $t=0$ K	13
Figure I.10: Diagramme symbolique de phases d'un supraconducteur de type I	14
Figure I.11: Diagramme symbolique de phases d'un supraconducteur de type II	15
Figure I.12: Réseau de vortex, NbSe, $B=1T$, $T=1.8K$	15
Figure I.13: Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II	16
Figure I.14: (a) fil de NbTi finalisé, (b) montage des barreaux avant tréfilage, (c) fil Nb ₃ Sn avant traitement thermique	16
Figure I.15: Fils supraconducteurs HTC	17
Figure I.16: Fil en MgB ₂	18
Figure I.17: Cellule unitaire de Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x et présentation schématique de la Technique OPIT. Chaleur intermédiaire et finale le traitement n'est pas indiqué	20

Figure I.18: Structure cristallographique de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	21
Figure I.19: Variation de la température critique dans $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{7+d}$	21
Figure I.20: Structure cristallographique de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$	22
Figure I.21: Variation de la température critique dans $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$	23
Figure I.22: Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN_2).....	25
Figure I.23: Schéma de principe d'une bobine supraconductrice couplée à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur R_{sh} est la résistance de protection R_{ch} et V_{ch} forment le circuit de chauffage du shunt supraconducteur	26
Figure I.24: Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres ..	26
Chapitre II	
Figure II. 1: Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur	28
Figure II. 2: Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur.....	29
Figure II. 3: Caractéristique $E(J)$ basée sur le Modèle de Bean.....	30
Figure II. 4: Modèle de Flux Flow et Creep	31
Chapitre III	
Figure III.1: Modèle 3D d'une machine synchrone à aimant permanent	37
Figure III.2: Modèle 3D de Diagramme vectoriel de la densité de flux magnétique dans la machine synchrone à aimant permanent.....	38
Figure III.3: Modèle 3D du Stator d'une machine synchrone.....	38
Figure III.4: Modèle 3D du Rotor d'une machine synchrone.....	39
Figure III.5: Rotors de machines synchrones à aimants permanents.....	39
Figure III.6: Cycle d'hystérésis	40
Figure III.7: Courbe de désaimantation	40

Figure III.8: Moteur supraconducteur Sumitomo	41
Figure III.9: Machine synchrone à élément supraconducteur HTC.....	42
Figure III.10: Induit à air de la machine Siemens AG : 400kW-1500 tr/min.....	42
Figure III.11: Aimant supraconducteur-Tous les fabricants industriels.	44
Figure III.12: Technique de magnétisation des pastilles supraconductrices.....	45
Figure III.13: Structure de l'accouplement supraconducteur (a) Coupe 3D l'ensemble (b) Rotor à aimants permanents (c) Rotor avec bobines supraconductrices.....	46
Figure III.14: Structure d'un moteur supraconducteur axial à aimants supraconducteurs réalisé au Japon	47
Figure III.15: Schéma de la MSAP dans le repère abc	48
Figure III.16: Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)	49
Figure III.17: Transformation triphasé a biphasé	52
Figure III.18: Transformation biphasé à biphasé.....	52
Figure III.19: Schéma bloc du modèle de MSAP	53
Figure III.20: Variation de courant I_q en fonction de temps	54
Figure III.21: Variation de courant I_d en fonction de temps	54
Figure III.22: Variation de vitesse ω en fonction de temps.....	55
Figure III.23: Variation de torque électromagnétique CE en fonction de temps.....	55
Figure III.24: Comparaison entre une machine conventionnelle et supraconductrice	57
Figure III.25 : Géométrie de machine MSAP dans FLUX 2D	58
Figure III.26: Affectation de région surfaciques	60
Figure III.27: Circuit intégré au projet	61
Figure III.28: Représentation de maillage	63

Figure III.29: Victor potentiel AN /Victor potentiel IN (a) Machine conventionnelle. (b) Machine supraconductrice	63
Figure III.30: Victor potentiel AN /Victor potentiel IN (a) Machine conventionnelle. (b) Machine supraconductrice	64
Figure III.31: Densité d'énergie magnétique dans la machine (a) Machine conventionnelle (b) Machine supraconductrice	64
Figure III.32: Densité de flux magnétique (a) Machine conventionnelle (b) Machine supraconductrice.....	65
Figure III.33: Perméabilité dans la machine (a) Machine conventionnelle (b) Machine supraconductrice.....	65
Figure III.34: Variation de courant en fonction de l'angle.....	66
Figure III.35: Caractéristique $B=f(H)$ de NDFEB et supraconducteur HTC.....	66
Figure III.36: Variation de l'intensité de courant en fonction de l'angle	66
Figure III.37: Variation du couple électromagnétique en fonction de l'angle.....	67
Figure III. 38 : Variation de flux magnétique en fonction de l'angle.....	67
Figure III 39: Variation de perte joule en fonction de l'angle	67
Figure III.40: Variation de l'énergie stockée en fonction de l'angle.....	68
Figure III.41: Variation de puissance active de la machine en fonction de l'angle.....	68
Figure III.42: Variation de perte joule de l'aimant en fonction de l'angle.....	68
Figure III.43: Variation de l'intensité du flux de l'aimant en fonction de l'angle	69
Figure III.44: Variation de l'énergie stockée de l'aimant en fonction de l'angle.....	69

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Température critique de quelques matériaux supraconducteurs.....	12
Tableau I.2: Valeurs critiques des matériaux supraconducteurs de type I.....	14
Tableau I.3: Paramètres critiques des supraconducteurs HTS pour les applications de puissance	18

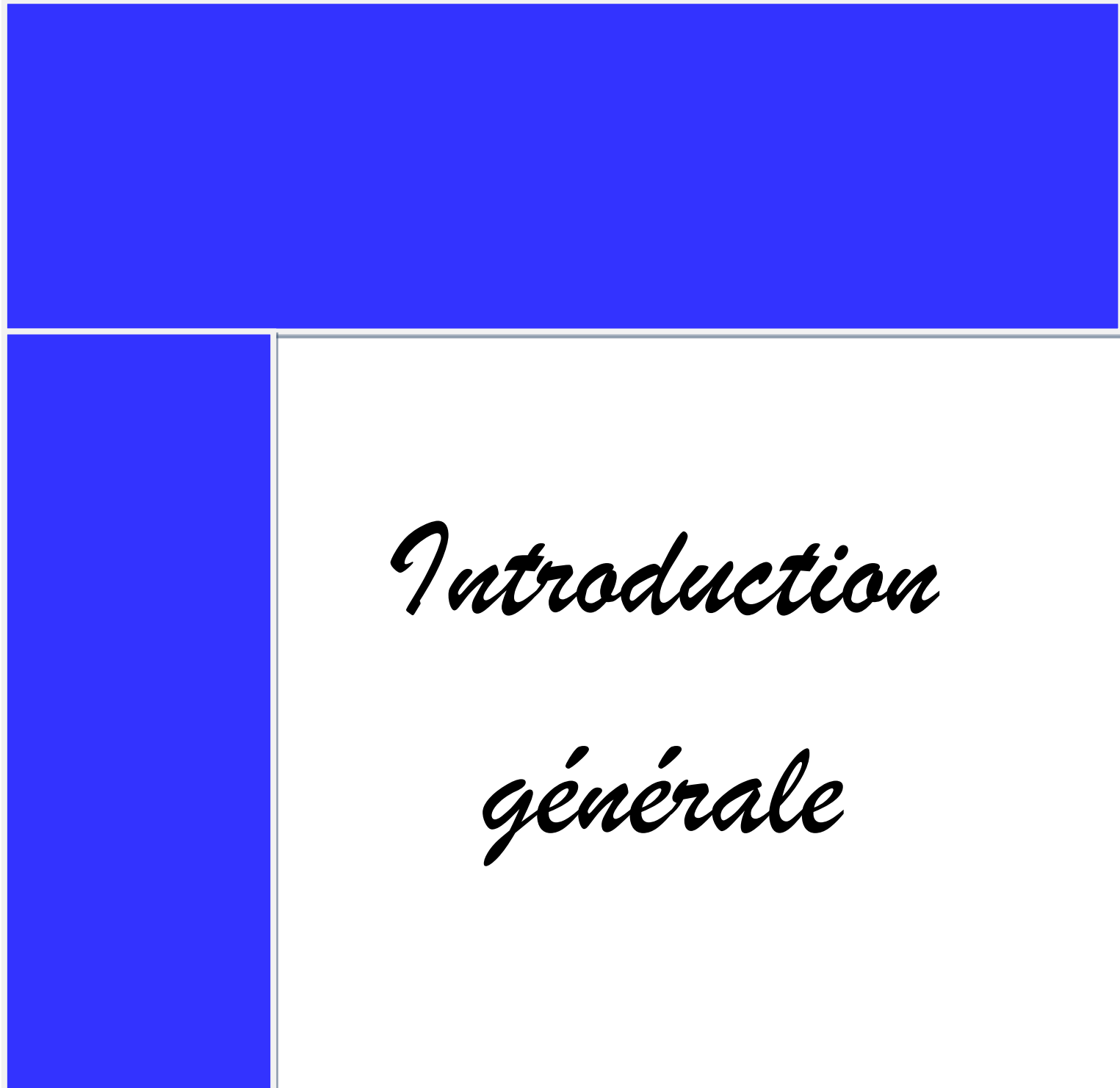
Chapitre III

Tableau III.1: Quelques réalisations de machines à aimants supraconducteurs	47
Tableau III.2: Paramètre de la machine	52
Tableau III.3: Paramètres de géométrie étudiée.....	59
Tableau III.4: Caractéristique de chaque région surfacique.....	60
Tableau III.5: La machine classique	61
Tableau III.6: La machine supraconductrice.....	61
Tableau III.7: Quality de maillage	62

Liste des symboles et abréviations

J_c	Densité de courant critique	[A/m²]
T_c	Température critique	[K]
H_c	Champ magnétique critique	[A/m]
B	Induction magnétique	[T]
μ₀	Perméabilité magnétique a vide	[H/m]
H	Champ magnétique	[A/m]
E	Champ électrique	[V/m]
B	Induction magnétique	[T]
D	Induction électrique	[C/m²]
ρ	Densité volumique des charges électriques	[C/m³]
LTS	Low Temperature Superconductors	
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage	
BTC	Base température critique	
HTC	Haute température critique	
TAFF	Le thermally activated flux-flow	
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents	
a,b,c	Axes liés aux enroulements triphasés	
d ,q	Composantes de Park (lié au rotor) directe et quadratur	
θ	Position angulaire du rotor par rapport au stator	
ω	Vitesse électrique du rotor	
[P(θ)]	Matrice de transformation de Park	
[P(θ)]⁻¹	Matrice de transformation inverse de Park	
V_a, V_b, V_c	Tension statorique de la phase a,b et c	
V_s	Tension statorique	
V_d, V_q	Tensions statoriques sur l'axe direct et en quadrature	
i_a i_b i_c	Courant statorique da la phase a,b et c	
i_s	Courant statrorique	
φ_a, φ_b, φ_c	Flux statorique de la phase a,b et c	
φ_s	Flux statorique	
φ_d, φ_q	Flux statorique d'axe direct et en quadrature	

Φ_f	Flux des aimants
C_r	Couple résistant
C_{em}	Couple électromagnétique
C_f	Couple de frottement
J	Moment d'inertie
f_c	Coefficient de frottement
p	Nombre de paires de pôles
ω_r	Vitesse électrique du rotor

The page features a blue header bar at the top and a blue vertical sidebar on the left side. The main content area is white.

Introduction générale

Introduction générale

Dans les années 1960, l'histoire des machines supraconductrices a commencé, la première machine fabriquée en 1967 étant un générateur électrique supraconducteur utilisant entièrement des fils de NbTi. Puis la découverte des supraconducteurs à haute température (HTS) a été le point de départ de nouvelles études et recherches sur les machines supraconductrices et se poursuit encore aujourd'hui [1].

Plusieurs recherches et études ont été menées sur les moteurs supraconducteurs et nombre d'entre eux ont été fabriqués dans le monde entier. Ces actionneurs sont souvent des machines synchrones, de structure similaire aux machines conventionnelles, mais plus performantes. L'utilisation de fils supraconducteurs à haute température pour les moteurs supraconducteurs peut entraîner des économies importantes en taille et en masse, ainsi qu'une efficacité améliorée par rapport aux machines conventionnelles. Les puissances envisagées sont généralement de l'ordre de quelques mégawatts pour des applications telles que la propulsion marine ou les éoliennes [1]. Lorsque les supraconducteurs sont refroidis en dessous d'une température critique, deux propriétés distinctes apparaissent : une résistance nulle et un diamagnétisme parfait. Les matériaux supraconducteurs sont capables de parfaitement transporter le courant sans aucune perte d'énergie (ne chauffent pas), en raison de leur résistance électrique nulle, ce qui les rend très attractifs par rapport à la technologie traditionnelle à base de cuivre ou d'aluminium.

La supraconductivité est la zone limitée par trois grandeurs qui définissent une surface critique caractérisée par l'apparition d'un champ électrique, la température critique (T_c), la densité de courant critique (J_c) et le champ magnétique irréversible (H) qui sont des grandeurs intrinsèques dans une substance. Les matériaux supraconducteurs à haute température ont d'excellentes propriétés critiques de courant et mécaniques qui en font des matériaux appropriés pour les applications à champ magnétique élevé. Ainsi, de nombreuses études sont menées pour appliquer des bobines à champ magnétique élevé constituées de Fils HTC pour les machines électriques telles que les moteurs et les générateurs ainsi que les équipements d'analyse [2-3-4]. Tels que la résonance magnétique nucléaire et l'imagerie par résonance magnétique. Parmi eux, les moteurs et générateurs à bobines HTC pouvant avoir une densité de puissance de sortie élevée, ils sont étudiés en tant que bobines de champ des machines synchrones en raison des propriétés des supraconducteurs qui provoquent un courant alternatif. Les applications de la supraconductivité sont nombreuses, parmi lesquelles les

aimants supraconducteurs, les moteurs et générateurs supraconducteurs, câbles de transport, le stockage d'énergie et les limiteurs de courant de défaut, et dans les transformateurs.

L'objectif principal de ce mémoire sera d'étudier et de modéliser la machine synchrone supraconductrice au moyen d'un logiciel de simulation et de comparer et d'analyser les résultats obtenus avec ceux de la machine conventionnelle, où nous remplacerons l'aimant permanent par un aimant supraconducteur et discuterons les résultats obtenus. Pour ce la on a organisé notre travail comme suit:

- ✚ Dans le premier chapitre, nous fournirons des informations générales et détaillées sur les matériaux supraconducteurs afin de donner des idées sur le matériau utilisé dans notre étude. Nous présenterons également un bref historique et les propriétés les plus importantes qui caractérisent ses types, à savoir HTC **YBCO**, **BSCCO** et certaines de ses applications dans le domaine industriel.
- ✚ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la modélisation des Matériaux supraconducteurs et les équations mathématiques qui régissent ce phénomène physiques dans les supraconducteurs, ces modèles de comportement utilisant des formulations à base des équations électromagnétiques, qui sont utilisés pour l'étude et l'analyse des différents phénomènes a travers les logiciels de simulation.
- ✚ L'objectif du dernier chapitre sera de modéliser une machine synchrone à aimant supraconducteur à l'aide de deux logiciels de simulation; MATLAB et FLUX2D, où nous allons d'abord étudier la machine synchrone à aimant permanent puis on a remplacer l'aimant permanent par un aimant supraconducteur en utilisant des matériaux supraconducteurs de haute température HTC, Afin d'étudier et d'analyser la différence entre les deux structures proposées au terme des performances (la vitesse, la puissance et du courant... etc.). Pour montrer l'importance de l'introduction des matériaux HTC sur les machines conventionnelles, plus particulièrement sur ses fonctionnalités qu'ils ajoutent et l'étendue de leurs possibilités d'application. Pour ce la nous utiliserons deux logiciels de simulation pour discuter les différents résultats obtenus.

Finalement, nous clôturerons notre travail par une conclusion générale résumant le contenu de cette approche à travers ce mémoire et on terminera enfin, par quelques perspectives envisagées.

CHAPITRE 9

Généralités

Sur

Les

Matériaux

Supraconducteurs

I.1 Introduction :

Dans le cas de la supraconductivité, lorsqu'un matériau est refroidi à très basse température, la résistance devient nulle, et devient ainsi capable de transmettre parfaitement le courant électrique sans perdre d'énergie. Le matériau a également la propriété de repousser complètement le champ magnétique qui l'entoure, qui peuvent être observés à travers les effets étonnants de l'élévation magnétique.

De manière générale, le but du premier chapitre sera de fournir des informations de base sur les matériaux supraconducteurs et ses caractéristiques afin de donner une idée préalable du matériel que nous utiliserons dans cette recherche, que nous présenterons plus tard.

Au début du chapitre, nous présenterons un bref historique de la découverte de la supraconductivité et de son développement au fil des ans, puis présenté les informations de base de manière brève et simplifiée sur les types de supraconducteurs, où nous distinguerons deux types de base de supraconducteurs, où chaque type a des caractéristiques différentes de l'autre.

Ensuite, nous avons un peut détailler et expliquer la classification de ces matériaux supraconducteurs selon leur température : à savoir, les supraconducteurs à basse température critique (SBTC) et ceux à haute température critique (SHTC), dont on a donné quelques exemples comme les (YBCO et BSCCO).

Enfin, les principales applications des supraconducteurs en électrotechnique seront également présentés dans cette partie, telles que ; les aimants permanents supraconducteurs, les transformateurs et les machines tournantes....., car ils peuvent être utilisés pour améliorer les caractéristiques de nombreux appareils et machines, et c'est ce que nous présenterons et discuterons au chapitre trois.

I.2. Histoire:

Depuis la démonstration de la supraconductivité du mercure par Kamerlingh Onnes et Gilles Holst en 1911 (température critique $T_c = 4,15$ K), les découvertes de nouveaux matériaux supraconducteurs se sont succédées comme le montre la figure 1.1 les dates d'émergence de nouvelles classes et de changements dans leur enregistrement les températures critiques au fil du temps. Soixante ans après la découverte du phénomène, les seuls supraconducteurs identifiés étaient des métaux purs, des alliages métalliques et des composés intermétalliques. La température critique connue la plus élevée était de 23,2 K dans le

composé Nb₃Ge et on avait le sentiment que la supraconductivité et le magnétisme étaient incompatibles. Au cours des 40 années suivantes, la supraconductivité a été mise en évidence dans un nombre croissant de composés appartenant à des groupes de matériaux de natures physico-chimiques très diverses avec, pour nombre d'entre eux, des températures critiques T_c supérieures, voire bien supérieures à celle du composé Nb₃Ge. Ainsi :

- ✚ Dans les années 1970, des phases de Chevrel supraconductrices ont été découvertes. Ce sont toujours des composés métalliques, mais ils contiennent des éléments chalcogènes (S, Se, Te) et, pour certains d'entre eux, montrent des signes de coexistence du magnétisme et de la supraconductivité ;
- ✚ À la fin des années 1970, l'attention s'est portée sur les premiers alliages de fermions lourds supraconducteurs, à base de lanthanides et d'uranides. Aujourd'hui ce groupe continue de s'enrichir de composés à températures critiques bien supérieures à celles très basses, démontrées par les résultats de physique qui y ont été initialement étudiés présentant une variété d'états de compétition et/ou de coexistence entre magnétisme et supraconductivité ;
- ✚ Dans les années 1980, l'accent a été mis sur la supraconductivité dans les composés organiques purs. Leurs températures critiques ne sont pas exceptionnelles, mais pour la première fois cette propriété est observée dans des matériaux ne contenant aucun élément métallique. Depuis, plusieurs composés organiques supraconducteurs de plus en plus complexes ont été systématiquement synthétisés ;
- ✚ En 1986 débute la construction de cuivres supraconducteurs à haute température critique dont la température de transition dépasse le seuil de température d'ébullition de l'azote liquide. Cette découverte donne un nouvel élan à la recherche et apporte un saut quantique dans le monde de l'industrie, intéressant par les applications du bénéfice théorique qu'il génère ;
- ✚ Dans les années 1990, le matériau supraconducteur fullerène est apparu, qui est principalement composé de composés moléculaires C₆₀ dopés avec des éléments alcalins. La température critique la plus élevée est jusqu'à 40 K. Quelques années plus tard (2005) plusieurs matériaux à structure graphite divisée ont été ajoutés à ces composés ;
- ✚ En 2001, le composé MgB₂ s'est avéré avoir des propriétés extrêmement excellentes parmi les nouveaux matériaux supraconducteurs. Il aurait pu être placé simplement parmi les composés métalliques par simple oubli historique, mais avec une

température critique de 39 K, il attire tout l'intérêt des chercheurs du domaine car sa malléabilité permet des applications industrielles de mise en forme et magnétoélectriques ;

- ✚ Avec l'avènement de 2005, les pnictides ont été renommés supraconducteurs à base de fer en raison du fait que le fer lui-même est l'élément paramagnétique, qui présente une supraconductivité. Dans cette famille, la température critique la plus élevée dépasse désormais 50 K ;
 - ✚ 2015 a été la plus grande surprise, avec la découverte de la supraconductivité dans le composé H3S qui, lorsqu'il est exposé à une pression supérieure à 200 gigapascals, montre une température critique supérieure à 200 K. Cela permet de l'appliquer plus.
- [5]

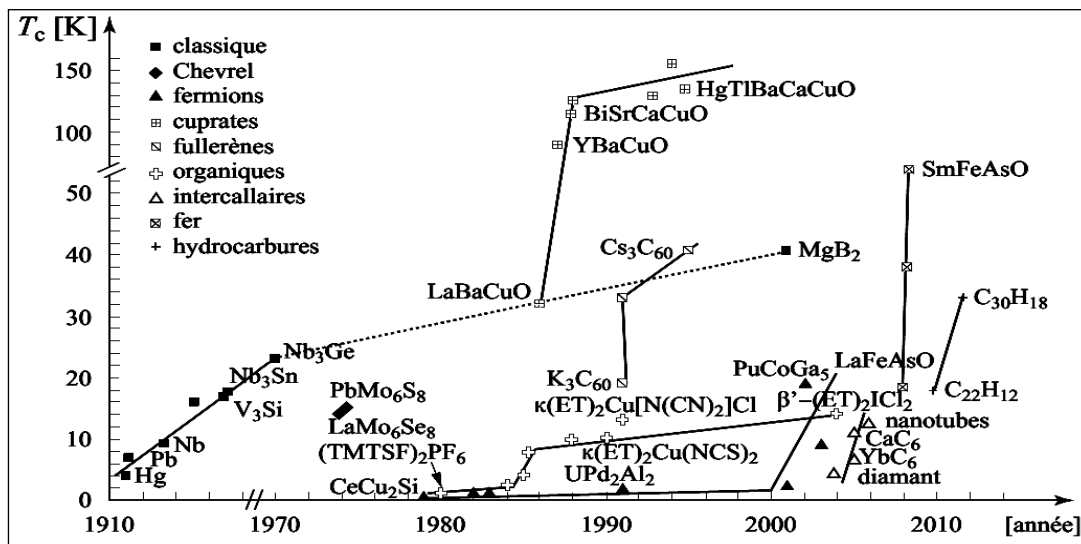


Figure I.1: Évolution dans le temps des températures critiques les plus élevées dans chacune des grandes classes de supraconducteurs [5].

I.3. Propriétés des supraconducteurs:

I.3.1. Résistivité électrique nulle:

La résistance électrique nulle et l'effet Meissner sont les deux caractéristiques de la supraconductivité. En 1908, H. Kamerlingh Onnes devient la première personne qui réussit à liquéfier l'hélium. Trois des années plus tard, lorsqu'il a examiné la résistance électrique à basse température du mercure, il a découvert que la résistivité du mercure tomba brusquement à zéro lorsque la température fut abaissée en dessous de 4.21 K illustré à la figure 1.2. Il a nommé ce phénomène de supraconductivité. Le supraconducteur résistait finalement à la

température de transition T_c , c'était normal, et la résistance diminuait rapidement juste à zéro à la T_c dessous, c'était le supraconducteur. La transition supraconductrice est une transition de phase du second ordre. [6]

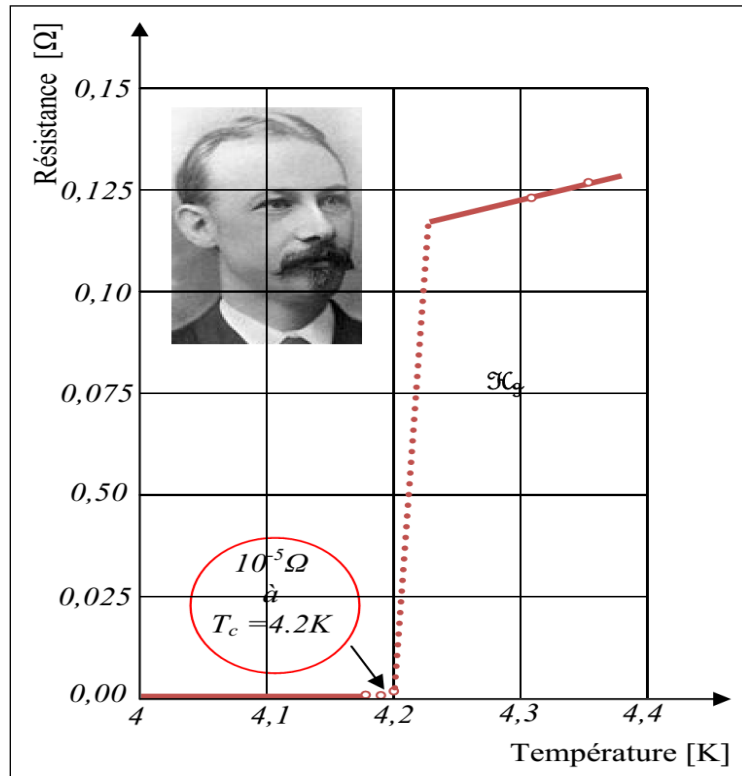


Figure I.2: Courbe de résistance d'un échantillon de mercure en fonction de la température. [7]

I.3.2. Effet Meissner :

En 1933, Walther Meissner découvre l'effet qui porte son nom avec Robert Ochsenfeld. Cet effet est cohérent avec l'exclusion totale du champ magnétique par un supraconducteur. On parle aussi de perméabilité magnétique parfaite. Lorsqu'un supraconducteur est exposé à un champ magnétique, les courants qui repoussent ce dernier se mettent à tourner sur une épaisseur λ appelée longueur de Londres. Ainsi, l'induction magnétique est complètement expulsée du matériau. Cet effet existe jusqu'à une certaine valeur de champ magnétique H_{c1} appelée premier champ critique. De plus, l'induction commence à pénétrer dans le supraconducteur. Les valeurs de H_{c1} pour les supraconducteurs à haute température critique sont de l'ordre de la dizaine de milli tesla. En électrotechnique, l'effet Meissner peut être généralement négligé, car les inductances mises en jeu sont bien supérieures à ces valeurs. [8]

Comparaison entre les matériaux supraconducteurs et conducteurs parfaits

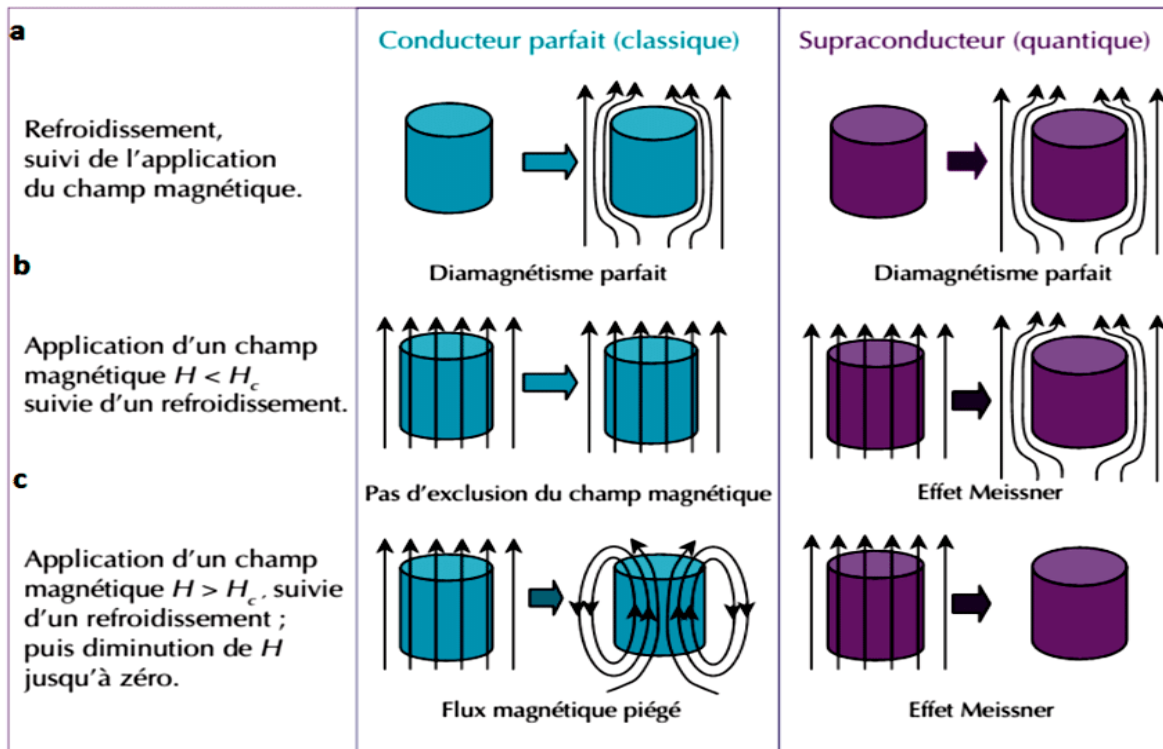


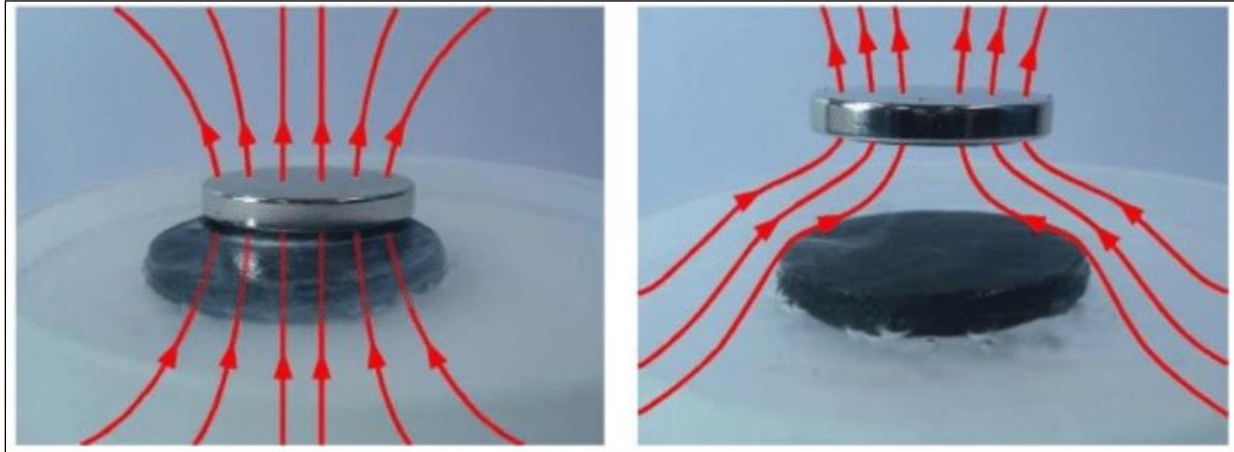
Figure I.3 : Illustrant l'effet de Meissner et la différence entre un supraconducteur et un conducteur parfait . [9]

La figure 1.3 vient d'illustrer cette différence en plaçant ces deux matériaux dans un champ extérieur:

- ✚ Un champ magnétique est appliqué au matériau, dont la température passe alors à la température ambiante.
- ✚ La température des deux échantillons est abaissée en dessous de leur température critique, le supraconducteur expulsant le champ magnétique grâce à l'effet Meissner. En ce qui concerne le conducteur parfait, rien ne se passe parce qu'il n'a vu aucune différence sur le terrain.
- ✚ Le champ magnétique externe est supprimé. L'induction magnétique reste nulle dans le supraconducteur. Le conducteur idéal est le siège des courants provoqués par la différence de champ.

En conclusion, cet effet est différent de celui d'un conducteur idéal. Un supraconducteur qui se refroidit en dessous de la température de T_c repoussera le champ magnétique lors de son déplacement, par contre, le champ magnétique reste constant dans un conducteur idéal qui ne

développera aucune cause car une seule différence de champ magnétique peut les induire. Au début, le phénomène supraconducteur semblait difficile à expliquer en raison du fait qu'il était nouveau dans sa conception, mais plusieurs tentatives ont été faites pour l'expliquer. [9]



$T > T_c$

$T < T_c$

Figure I.4: Effet Meissner, lévitation d'un supraconducteur. [9]

I.3.3. La surface critique:

L'état de supraconductivité est limité par les quantités des trois propriétés physiques ; Température critique (T_c), champ magnétique critique (H_c) et densité de courant critique (J_c). Chacune de ces quantités est fortement dépendante des deux autres. Le maintien de l'état supraconducteur nécessite que le champ magnétique, la densité de courant et la température restent en dessous des valeurs critiques qui dépendent du matériau. Dans la représentation 3D, la région définie lorsque les trois grandeurs (T_c , H_c , J_c) sont prises en compte est appelée « surface critique » ; Illustration à la figure I-5. A partir de cette surface vers l'origine le matériau est supraconducteur. Les valeurs les plus élevées de H_c et J_c sont obtenues à $T = 0K$, tandis que la valeur la plus élevée de T_c est obtenue lorsque H et J sont à zéro. Lorsqu'elle se trouve dans des zones en dehors de cette surface, la substance est à l'état normal ou mixte. [10]

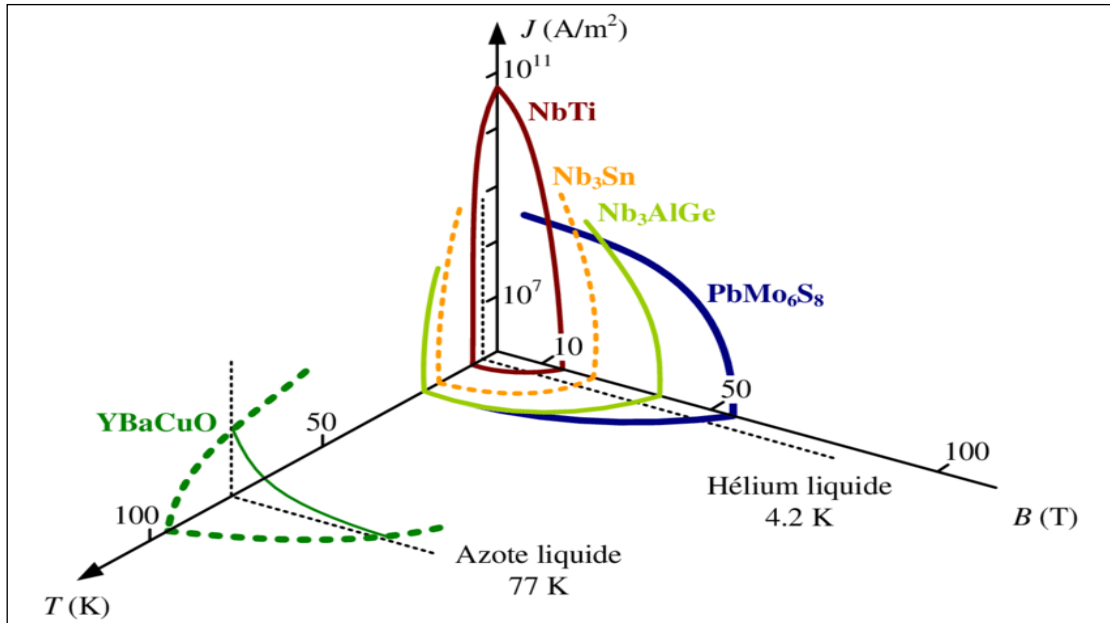


Figure I.5: Surface critique des matériaux supraconducteurs. [10]

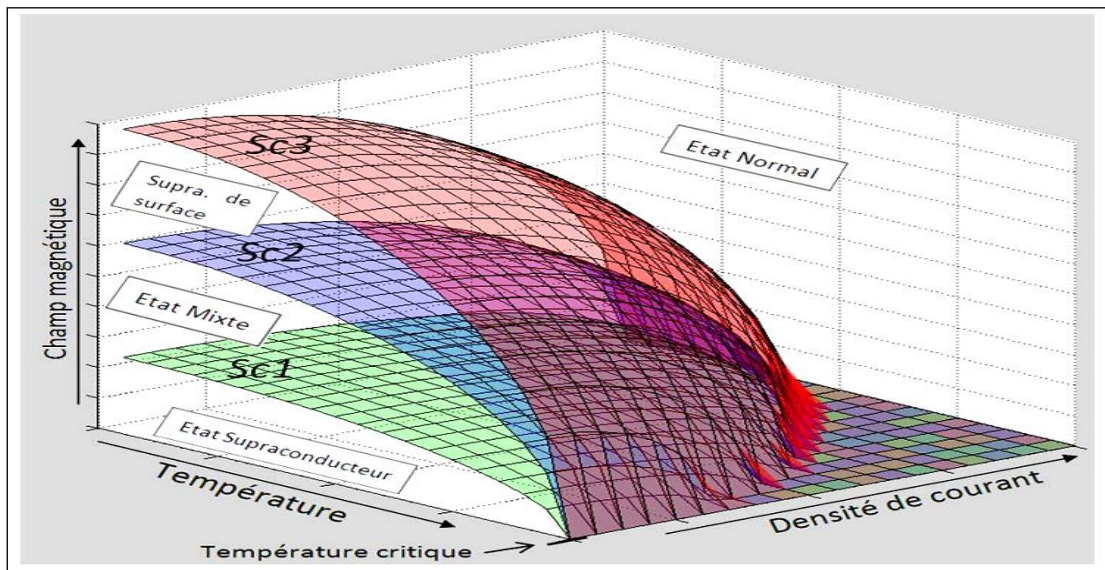


Figure I.6: Illustrant 3 surfaces critiques d'un supraconducteur ($Sc1$, $Sc2$ et $Sc3$). Entre ces surfaces, la supraconductivité apparait sous différentes formes. [8]

Les surfaces critiques ne sont que le prolongement dans la troisième dimension des lignes critiques. Ainsi, ils définissent les mêmes états de supraconductivité. [8]

I.3.4. Théorie BCS :

John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer ont proposé en 1957 la première théorie microscopique de la supraconductivité maintenant connue sous le nom de théorie BCS. Un élément conceptuel clé de cette théorie est le couplage d'électrons près du niveau de Fermi dans des paires de Cooper en interaction avec le réseau cristallin. L'image est fondamentalement la suivante, comme le montre la figure 1.7 : Un électron se déplaçant à travers un conducteur attirera des charges positives proches vers le réseau. Cette distorsion du réseau amène un autre électron, qui a une impulsion et un spin opposés, à se déplacer vers une région de densité de charge positive plus élevée. Il semble qu'un électron attire un autre électron par la vibration du réseau, qui peut vaincre la répulsion coulombienne, puis deux électrons viennent se lier entre eux. Les célibataires ne sont pas collés pour toujours. Ils cassent et réparent constamment. Les électrons individuels ne peuvent pas être identifiés, donc au lieu de les considérer comme des paires changeant dynamiquement, ils peuvent être considérés comme appariés en permanence. Les paires d'électrons peuvent se comporter très différemment des électrons uniques qui sont des fermions et doivent respecter le principe d'exclusion de Pauli. Les paires d'électrons agissent comme des bosons qui peuvent se condenser au même niveau d'énergie. Il y a de nombreuses paires d'électrons dans un supraconducteur, elles se chevauchent donc fortement, formant un "condensateur" très collectif. Le condensateur est fortement séparé du premier état excité par l'énergie de l'écart [6]

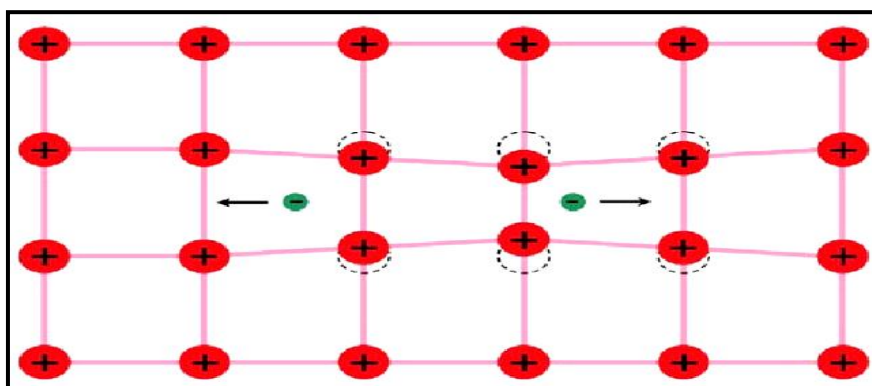


Figure I.7: La formation d'une paire de cuivre : un électron qui passe attire les ions chargés positivement de le treillis, provoquant une légère ondulation dans son sillage. Un autre électron passant à l'opposé direction est attirée par ce déplacement. [6]

La théorie BCS montre l'effet isotopique de ce que nous observons pour un matériau supraconducteur, la température critique est inversement proportionnelle à la masse de l'isotope utilisé dans le matériau, et l'effet isotopique a été observé dans un grand nombre de supraconducteurs. Deux des prédictions les plus importantes de la théorie BCS concernent la température de transition supraconductrice T_c et le gap : dans la limite de couplage faible. [6]

I.3.5. Température critique :

La température critique est la température à laquelle la résistance commence à tomber à zéro à laquelle un matériau devient supraconducteur. La transition apparaît comme une transition de l'état normal à l'état supraconducteur de la matière. De nombreux matériaux présentent des transitions de phase supraconductrices à basse température. La température critique la plus élevée était d'environ 23 K jusqu'à la découverte en 1986 de certains supraconducteurs à haute température. Une trentaine (30) de métaux purs et certains alliages tels que NbSn₃ et NbTi ont une résistance nulle à basse température et ont la propriété d'exclure les champs magnétiques de l'intérieur de ces supraconducteurs (effet Meissner, voir Tableau I.1). Ce type de supraconducteur est appelé "supraconducteur à basse température critique (SBTC)". D'autre part, les céramiques d'oxyde de cuivre-baryum qui ont atteint l'état de supraconductivité à des températures plus élevées sont souvent appelées «supraconducteurs à température critique (HCTS)» et forment une classe à part [10].

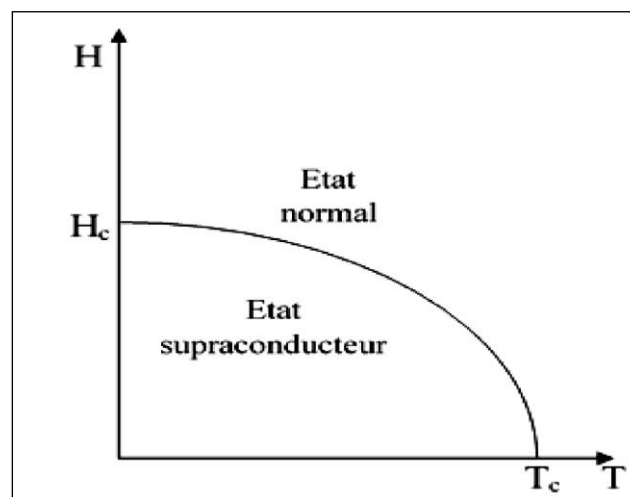


Figure I.8: Etat normal et supraconducteur d'un métal en fonction de la température [10]

Elément	T _c (K)	Elément	T _c (K)	Elément	T _c (K)
Al	1.175	Nb	9.2	Tc	7.8
Be	0.023	Np	0.075	Th	1.37
Cd	0.55	Os	0.65	Ti	0.39
Ga	1.09	Pa	1.40	Tl	2.39
Hf	0.13	Pb	7.2	U	0.2
Hg	4.15	Re	1.7	V	5.3
In	3.41	Rh	0.0003	W	0.012
Ir	0.14	Ru	0.5	Zn	0.9
La	4.88	Sn	3.75	Zr	0.55
Mo	0.92	Ta	4.47	Lu	0.1
Composé	T _c (K)	Composé	T _c (K)	Composé	T _c (K)
Nb ₃ Sn	18.1	MgB ₂	39	UPt ₃	0.5
Nb ₃ Ge	23.2	YPd ₂ B ₂ C	23	UPd ₂ Al ₃	2
Cs ₃ C ₆₀	19	HoNi ₂ B ₂ C	7.5	URu ₂ Si ₂	1.2
Nb _{0.6} Ti _{0.4}	9.8	PuCoGa ₅	18.5	YNi ₂ B ₂ C	15.5
Supraconducteurs à HT _c	T _c (K)	Supraconducteurs à HT _c	T _c (K)	Supraconducteurs à HT _c	T _c (K)
<i>La</i> _{1.83} <i>Sr</i> _{0.17} <i>CuO</i> ₄	40	<i>Tl</i> ₂ <i>Ba</i> ₂ <i>Ca</i> ₂ <i>Cu</i> ₃ <i>O</i> _{1+δ}	127		
<i>YBa</i> ₂ <i>Cu</i> ₃ <i>O</i> _{7-δ}	93	<i>HgBa</i> ₂ <i>Ca</i> ₂ <i>Cu</i> ₃ <i>O</i> ₈	135		
<i>Bi</i> ₂ <i>Sr</i> ₂ <i>Ca</i> ₂ <i>Cu</i> ₃ <i>O</i> ₁₀	110	<i>Hg</i> _{0.8} <i>Tl</i> _{0.2} <i>Ba</i> ₂ <i>Ca</i> ₂ <i>Cu</i> ₃ <i>O</i> _{8.33}	138		

Tableau I.1: Température critique de quelques matériaux supraconducteurs [10]

I.3.6. Champ magnétique critique:

Les résultats présentés montrent qu'à travers de nombreuses études et expérimentations, la valeur du champ magnétique a un rôle fondamental dans la supraconductivité. Le champ appliqué est caractérisé par une certaine valeur appelée champ magnétique critique (H_c), propre à chaque supraconducteur. Lorsque cette valeur est dépassée, la supraconductivité disparaît. [11] Ce comportement s'explique par la pénétration du champ dans un supraconducteur. L'induction magnétique à l'intérieur du matériau est donnée par la relation suivante : $B = \mu_0 (H + M)$

μ_0 : la relativité magnétique du vide. H : le champ magnétique à l'intérieur du matériau.

M: l'aimantation

I.3.7. Densité de courant critique J_c (H, T) :

La densité de courant critique est cohérente avec la valeur maximale après laquelle un champ électrique apparaît. Pour les supraconducteurs de type I, la répartition du courant n'est pas homogène. Le courant de transport ne circule qu'en surface en pénétrant profondément dans Londres. Pour les supraconducteurs de type II, la densité de courant critique dépend

fortement de l'induction B et donc de la présence de vortex dans la structure du matériau. Pour l'inductance transversale à l'état mixte, un supraconducteur idéal a une densité de courant nulle. Le courant de transport interagit avec les tourbillons et ceux-ci se déplacent lorsque la force de Lorentz (JcB) est supérieure aux forces de serrage provoquant une dissipation dans le matériau. Lorsque la densité de courant dépasse une valeur critique J_c , les tourbillons se relâchent. Il s'agit d'un système de flux de flow (Fig. I.9) déclenché, les tourbillons se déplacent, un champ électrique proportionnel à $J-J_c$ est généré. Dans le système de flux, une résistance apparaît dépendante de l'induction magnétique. Pour obtenir de grandes densités critiques de courant, les tourbillons doivent être fermement intégrés dans le matériau. [12]

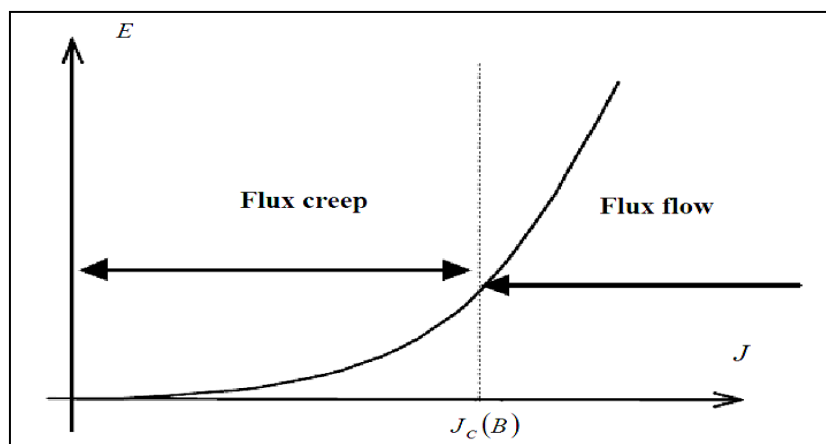


Figure I.9: Caractéristique champ électrique-densité de courant à $t=0$ K. [12]

I.4. Types des supraconducteurs :

Après avoir précisé les trois grandeurs critiques des supraconducteurs J_c , T_c et H_c et après avoir déterminé la supraconductivité, on constate que lorsque la valeur est sous le champ magnétique critique H_c , le matériau passe rapidement dans un état de supraconductivité et le champ magnétique ne pénètre pas le matériel plus loin. Cependant, ce comportement n'est pas vrai pour tous les matériaux supraconducteurs car il existe des matériaux en dessous du minimum, qui passent dans une phase mixte avant d'entrer, à partir d'un second seuil critique, dans l'état supraconducteur. On distingue donc deux types de supraconducteurs. [13]

I.4.1. Supraconducteurs de type I :

Ces matériaux ne contiennent qu'un "seuil" d'un champ magnétique, qui était autrefois appelé le champ critique H_c . Le champ magnétique dans ce type de matériau pénètre

partiellement sur une épaisseur appelée longueur de pénétration de Londres où se développent les super-courants. Dans ce type de supraconducteur, il n'y a que deux états : soit l'état supraconducteur en dessous de H_c où la résistance est nulle et le matériau est magnétique, soit l'état normal au-dessus de H_c où la résistance est élevée. Les matériaux de type I restent supraconducteurs tant que le champ est inférieur au champ critique H_c . (Fig. 1-10). [13]

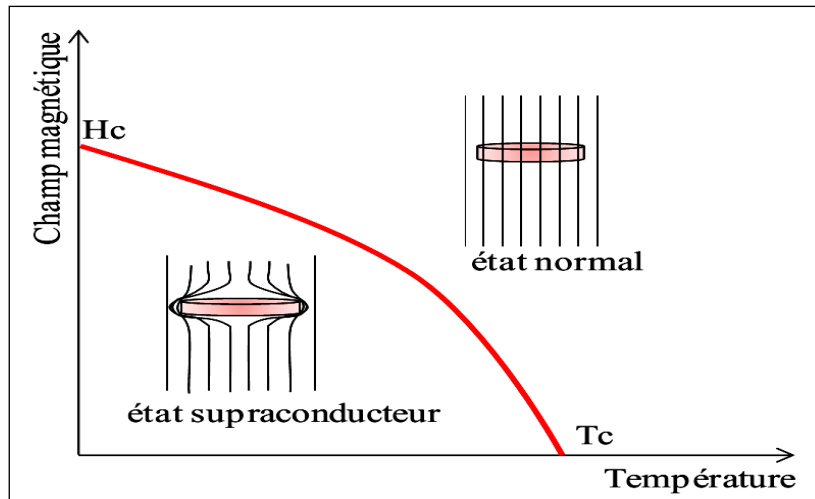


Figure I.10: Diagramme symbolique de phases d'un supraconducteur de type I [13]

Les matériaux purs (métaux) tels que le plomb, l'aluminium, le mercure et l'étain sont des supraconducteurs de type I. Leurs valeurs critiques sont données dans le tableau 1-2. Il convient de noter qu'il existe certains types de supraconducteurs qui n'ont pas encore d'application dans l'industrie.

Matériel	T_c (K)	$\mu_0 H_c$ (T)
Pb (Plomb)	7.193	0.0803
Al (Aluminium)	1.2	0.0105
Sn (Etain)	3.722	0.0305
Hg (Mercure)	4.153	0.041

Tableau I.2: Valeurs critiques des matériaux supraconducteurs de type I [13]

I.4.2. Supraconducteurs de type II :

Les supraconducteurs de type II ont deux seuils contrairement aux supraconducteurs de type I qui ont un seul champ magnétique critique H_c , comme le montrent la Figure 1-11 et la Figure 1-13. Le premier champ critique H_{c2} sous lequel le matériau commence à passer de l'état normal, où le matériau a une résistance élevée, à l'état mixte. Dans ce cas, le matériau

présente une perméabilité magnétique partielle. Une partie du champ pénètre dans le matériau. La valeur du champ critique H_{c2} est généralement élevée ($\mu_0 H_{c2}$ de quelques Tesla) mixte dans le cas de la supraconductivité pure où le champ magnétique contourne le matériau. En dessous de cette valeur de H_{c1} , le matériau a une perméabilité magnétique parfaite et une résistance nulle (Fig. 1-13) [13]

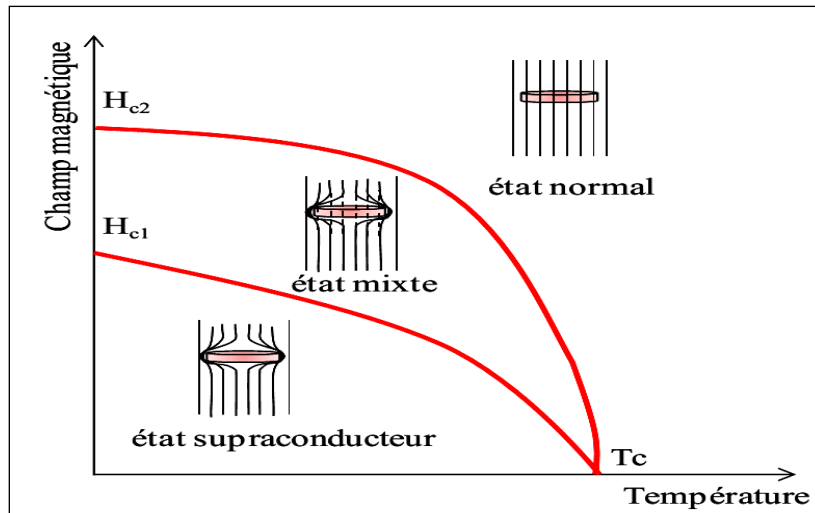


Figure I.11: Diagramme symbolique de phases d'un supraconducteur de type II. [13]

Le champ magnétique pénètre dans le matériau à travers des tubes de flux appelés "vortex" entre les valeurs de H_{c1} et H_{c2} . Ce sont les piliers qui se forment dans le matériau lorsque le champ magnétique en eux dépasse la valeur de H_{c1} . Le matériau crée des courants supraconducteurs qui circulent autour de cet arbre sous forme de vortex. [13]

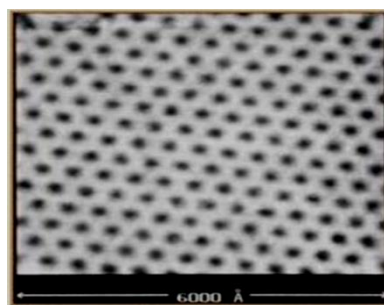


Figure I.12: Réseau de vortex, NbSe, $B=1T$, $T=1.8K$ [13]

Contrairement à un supraconducteur de type I. Ce type de supraconducteur a des valeurs plus élevées de champs $H_{c2} \gg H_{c1}$ et des courants et températures critiques et peut être utilisé dans des applications industrielles La figure 1-11 montre que lorsqu'un champ magnétique externe H est appliqué à un matériau supraconducteur de type II, cela induit le champ

magnétique B s'oppose à ce type de supraconducteur. Le champ magnétique appliqué jusqu'à ce que le matériau passe de l'état supraconducteur à l'état mixte puis de l'état mixte à l'état normal. [13]

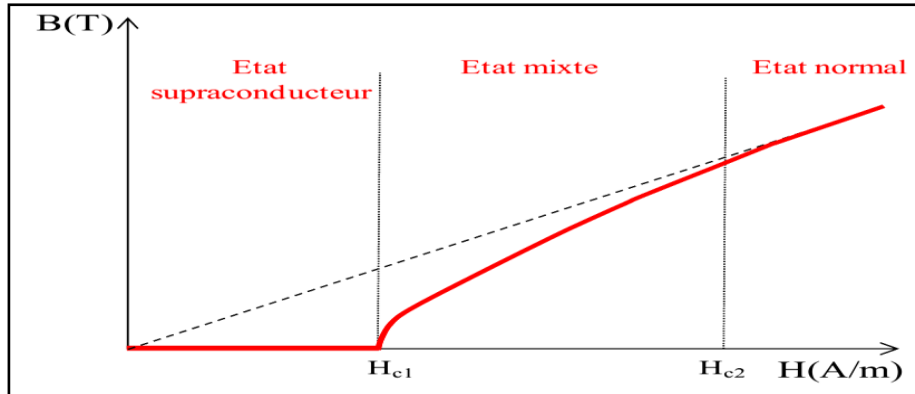


Figure I.13: Caractéristique $B(H)$ d'un supraconducteur de type II [13]

I.5. Matériaux supraconducteurs selon leur température :

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

Ce matériau, travaillant avec moins de 18K, est à base d'alliages métalliques ; La majorité utilise une température de 4,2K. Afin de la distinguer de la céramique, on lui a attribué la désignation de "supraconducteur critique à basse température" (SBTC). Plusieurs alliages SBTC se distinguent. Le niobium-titane (NbTi) et le niobium-étain (Nb₃Sn) sont encore les plus utilisés à ce jour, notamment dans la production de bobines de champ magnétique [14]. La Figure. I.14 donne un aperçu de ces connecteurs.

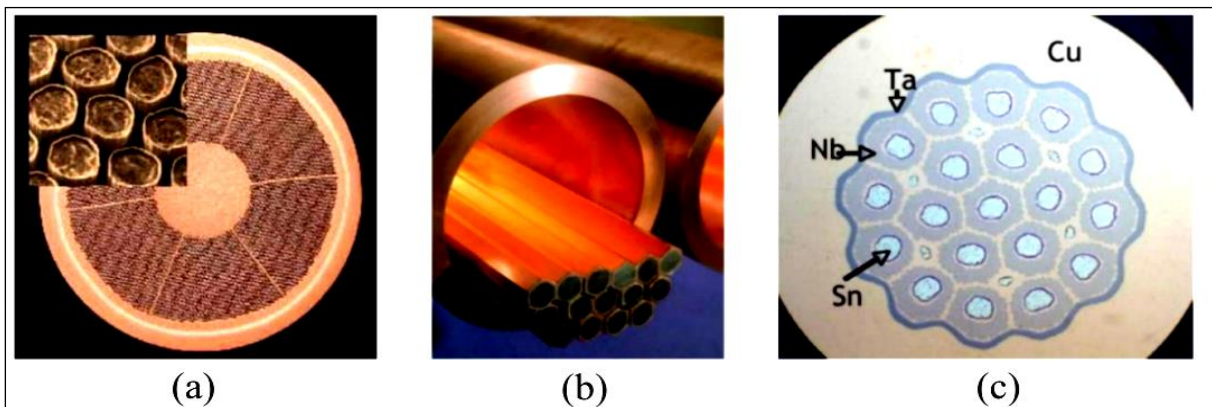


Figure I.14: (a) fil de NbTi finalisé, (b) montage des barreaux avant tréfilage, (c) fil Nb₃Sn avant traitement thermique [15].

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

En 1986, des supraconducteurs à haute température critique ont été découverts, basés sur des matériaux céramiques tels que le baryum et l'yttrium. Deux catégories se distinguent donc, les BSCCO et les YBCO. Le premier a une structure de type PIT (poudre à l'intérieur du tube), ce qui en fait un fil robuste et peut facilement former des bobines pour des applications telles que les moteurs électriques, avec une longueur de câble maximale de 1 000 mètres actuellement atteinte. Le second, à structure multicouche de matériaux incinérés et recuits, possède des propriétés permettant d'envisager une utilisation avec une densité de courant et de champ magnétique plus importante, et peut atteindre actuellement près de 500m. Il trouve une utilisation dans le domaine des lignes de transmission. La recherche actuelle sur ce matériau est principalement pour YBCO. Il faut aussi considérer le cas des matériaux massifs constitués de mono-domaines, ils peuvent permettre de s'opposer à des flux magnétiques très élevés, de réaliser un écran magnétique, ou de piéger le champ magnétique pour concevoir un aimant supraconducteur. Les granulés actuellement produits peuvent avoir jusqu'à 50 mm de diamètre, rectangulaires ou même hexagonaux. [14-16]

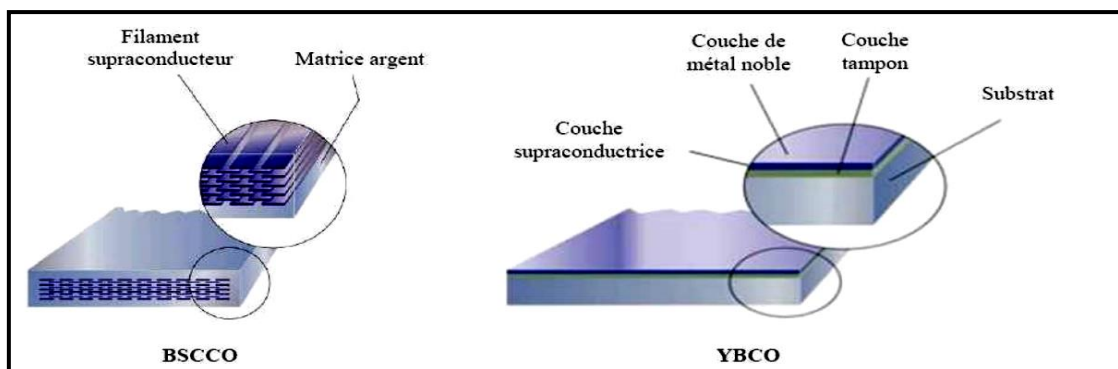


Figure I.15: Fils supraconducteurs HTC [16].

Un nouveau supraconducteur a été découvert en 2001, le diborure de magnésium (MgB_2), qui comporte plusieurs bandes dans une charpente en cuivre nickel. Ce supraconducteur se trouve à mi-chemin entre SBTC et SHTC, avec une température critique de 39 K, et est utilisé à des températures de 20 K, permettant d'obtenir des résultats intéressants, même s'il est moins efficace que SHTC. De plus, sa base métallique en fait un fil pratique par exemple pour faire des bobines [14-16].



Figure I.16: Fil en MgB₂ [16].

I.6. Types des Supraconducteurs à haute température critique :

Les supraconducteurs à haute T_c sont des composés chimiques constitués de plusieurs unités répétitives d'atomes et d'éléments différents, qui peuvent être appelés cellules unitaires. La cellule unitaire du supraconducteur HTS-Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x- est représentée. C'est là qu'un minuscule cristal se forme à partir de billions de cellules unitaires, connu sous le nom de perle. Des millions de grains sont nécessaires pour faire un échantillon macroscopique. Les HTS sont des matériaux céramiques cassants, principalement des oxydes - leur résistance à température ambiante est environ 100 fois supérieure à celle du cuivre [17]. Comme le montre à la Figure 1-17

	YBCO	Bi-2212	Bi-2223
T_c(K)	93	78	110
B_{irr} 4.7 K (T)	>30	>30	>30
B_{irr} 77 K (T)	>5	0.005	0.5
J_c 4.7 K (A/mm²)	>100,000	5,000	3,000
J_c 77 K (A/mm²)	>10,000	100	500

Tableau I.3: Paramètres critiques des supraconducteurs HTS pour les applications de puissance [17].

Bednorz et Müller ont découvert le premier supraconducteur de Tc, l'oxyde de cuivre de lanthane (La, Ba) 2CuO_4 , qui a un Tc juste au-dessus de 30 K. Le matériau HTS avec le TC le plus élevé = 134 K, découvert jusqu'à présent, est $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$. Le premier supraconducteur avec $T_c > 77$ K était l'oxyde de cuivre et de baryum yttrium $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, mieux connu sous le nom de YBCO ou Y-123, qui, avec les oxydes de bismuth $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ et $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, actuellement appelés Bi-2212 et Bi-2223 HTS, est le matériau le plus avancé. Ces deux derniers composés sont également appelés BSCCO, qui signifie strontium bismuth et oxyde de cuivre-calcium. Le tableau 1-3 présente les paramètres critiques de YBCO, Bi-2212 et Bi-2223 - les plus HTS largement utilisés. [17]

I.6.1. Supraconducteur BSCCO :

Les connecteurs BSCCO constituent la base de toutes les applications HTS à grande échelle existantes. Ils sont appelés pilotes de première génération. BSCCO et les connecteurs commerciaux sont disponibles en plus grandes longueurs (jusqu'à 1 km). Les connecteurs BSCCO sont utilisés dans les applications de transmission d'aujourd'hui. Ils sont produits par le procédé Oxide-Powder-In-Tube (OPIT), dont un schéma simple est illustré à la Fig. 1-17. Le courant dans les conducteurs BSCCO doit traverser les joints de grains qui entravent le courant, sauf pour les angles faibles, donc une texture solide est nécessaire et mieux les grains sont alignés, plus la densité de courant critique du conducteur est élevée. Afin d'obtenir la texture et l'alignement des grains dans la poudre d'oxyde, qui sont initialement orientés de manière aléatoire, un laminage est nécessaire dans le processus de fabrication et les supraconducteurs sont réalisés sous forme de bandes minces ; Généralement 2-4 mm de large et 0,2-0,4 mm d'épaisseur. Les composés HTS sont des matériaux très fragiles. Pour améliorer significativement les propriétés mécaniques des rubans, le matériau supraconducteur est placé dans un tube en Ag, sélectionné pour ses bonnes propriétés mécaniques et de diffusion de l'oxygène. Les bandes peuvent avoir un noyau BSCCO simple ou multi filament. [17]

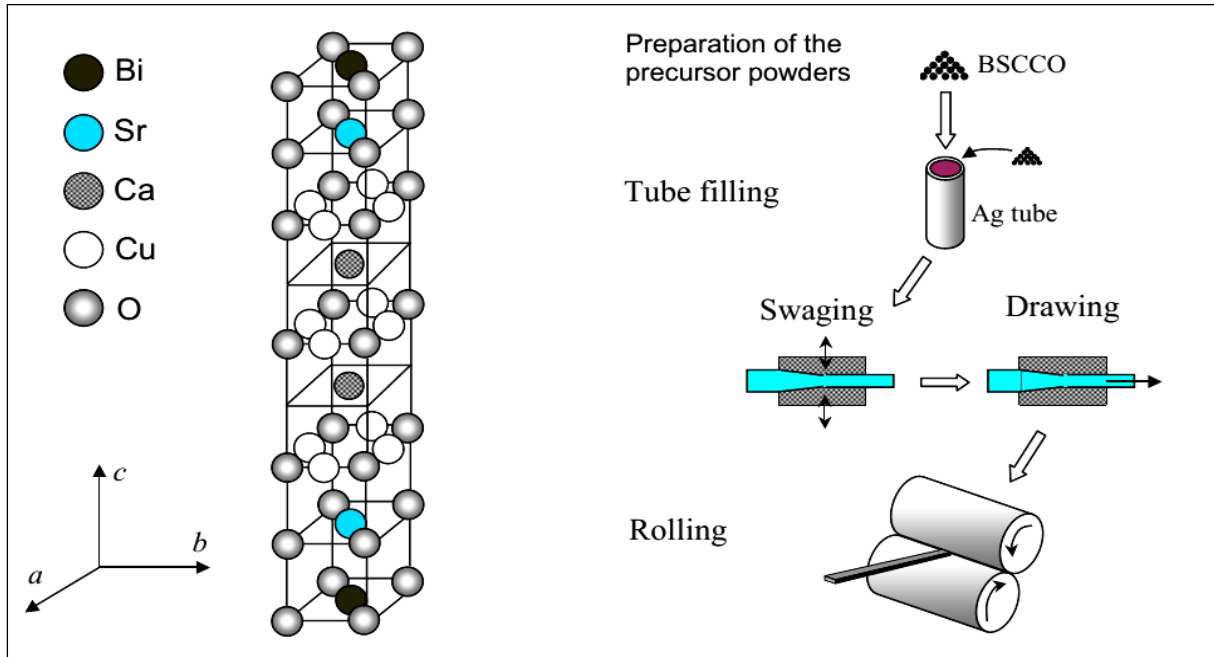


Figure I.17: Cellule unitaire de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ et présentation schématique de la Technique OPIT. Chaleur intermédiaire et finale le traitement n'est pas indiqué. [17]

BSCCO se caractérise par une structure multicouche de cellules unitaires ayant une variabilité intrinsèque le long des plans a, b, c de ses cristaux, et en raison du laminage pendant le processus de fabrication, les bandes produites ont des propriétés anisotropes. Une propriété très importante des matériaux BSCCO est le fort contraste de densité de courant critique - au moyen du champ magnétique appliqué perpendiculairement au côté large de la bande ($B//c$), J_c diminue rapidement, tandis que le champ magnétique parallèle est appliqué

($B // a, b$), la diminution de J_c est plus modérée. L'anisotropie de J_c dans les bandes Bi-2223 est discutée à des fins de modélisation. BSCCO a une double couche Bi-O, qui est presque isolante, faisant du composé un empilement supraconducteur, isolant et supraconducteur, très adapté aux applications électroniques. Le champ non réversible à 4,2 K est très important pour le Bi-2212 et le Bi-2223. Cependant, la densité de courant du Bi-2223 diminue plus rapidement dans le champ appliqué que celle du Bi-2212. À 4,2 K, le Bi-2212 peut supporter jusqu'à 1 000 A/mm² dans des champs de 26 T, tandis que la densité de courant correspondante pour le Bi-2223 est plus faible. C'est pourquoi le Bi-2212 est préféré pour les applications d'aimants HTS à 4,2 K à des températures supérieures à 20 K, cependant, les performances du Bi-2212 sont fortement dégradées par un fluage extrême, et à 77 K son champ non réversible n'est que de 0,005 T. D'autre part, le Bi-2223 à 77 K a un champ

irréversible de 0,5 T, ce qui n'est pas important pour la conception d'aimants mais est très bon pour maintenir les applications actuelles. Ainsi, le Bi-2223 est actuellement le matériau le plus largement utilisé pour les fils et câbles, fonctionnant à 77 K [17]

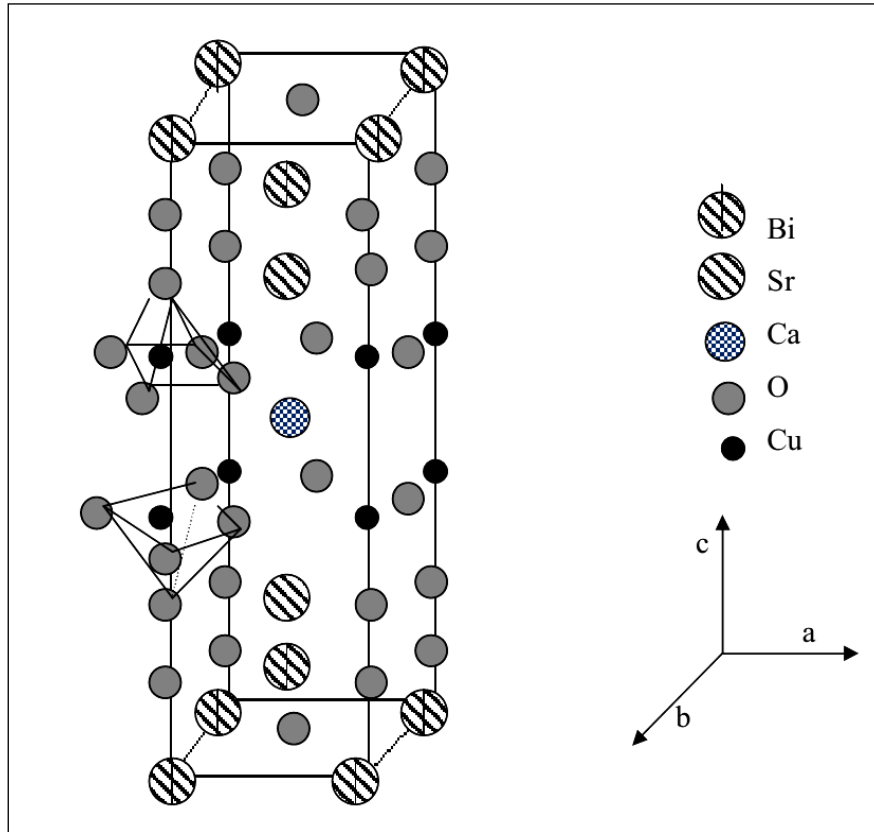


Figure I.18: Structure cristallographique de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$. [11]

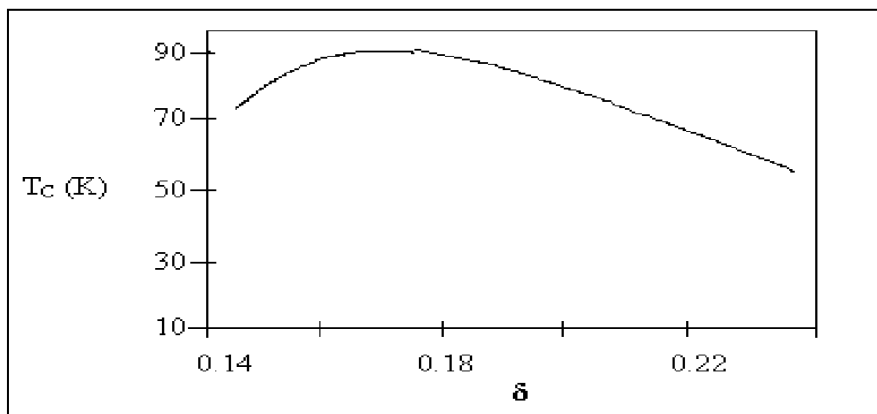
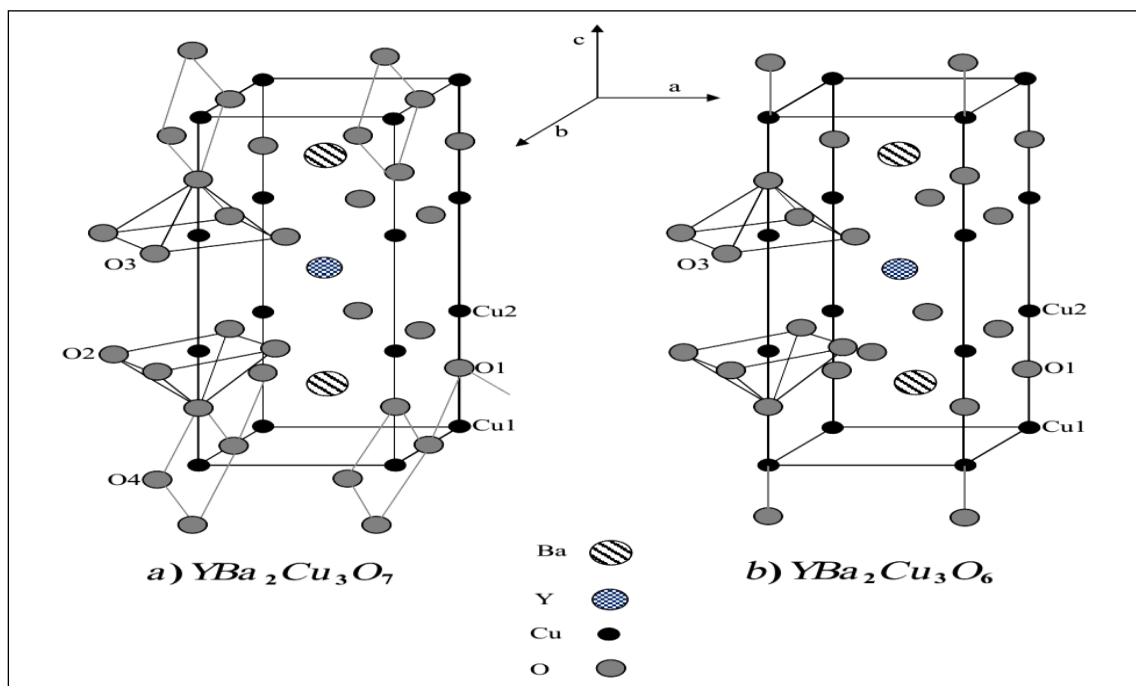


Figure I.19: Variation de la température critique en fonction de d dans $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{7+d}$. [11]

I.6.2. Supraconducteur YBCO :

Parmi les principales différences entre BSCCO et YBCO en termes de structure principale où le remplissage de la couche de réservoir pour ce dernier est métallique et non isolant comme le premier. Donc YBCO a moins de variance. YBCO a des densités de courant très élevées qui sont atteintes dans les matériaux YBCO - atteignant plus de 10 000 A/mm² à 77 K. La difficulté d'obtenir le conducteur long YBCO est due à sa technologie de fabrication, qui est assez différente de celle de YBCO. Le BSCCO est un conducteur enrobé, constitué d'un film mince de quelques micromètres de HTS déposé sur un substrat souple. Une forme de ce processus est le dépôt assisté par faisceau d'ions, appelé IBAD. Dans ce processus, des fils de HTS sont déposés sur une couche isolante alignée (couche IBAD), qui est placée sur un substrat flexible. Ce procédé vise à améliorer l'alignement des fils HTS et ainsi améliorer leurs performances électriques. D'autres facteurs présentent un défi majeur - substrat composite renforcé (RABiTS) et dépôt de substrat incliné (ISD), et YBCO est considéré comme le matériau le plus approprié pour les conducteurs de deuxième génération. Cependant, il n'est actuellement pas possible d'obtenir de longs conducteurs auprès de YBCO, de sorte que les chercheurs font beaucoup d'efforts de recherche pour résoudre ce problème. [17]



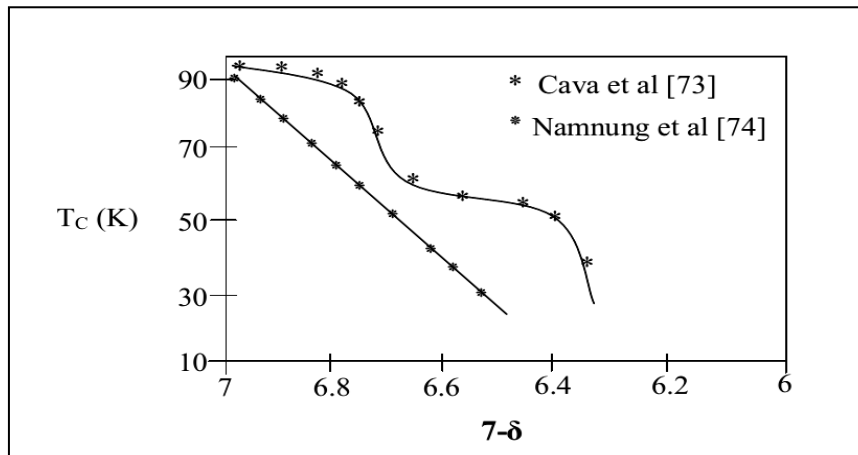


Figure I.21: Variation de la température critique en fonction de $(7-d)$ dans $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$. [11]

I.7. Principales applications des supraconducteurs :

Il existe trois catégories d'applications des supraconducteurs en électrotechnique selon la valeur utile de l'induction magnétique produite par un supraconducteur :

- ✚ -Champs magnétiques extrêmement puissants : Cette catégorie concerne les bobines de champ et les systèmes de stockage d'énergie.
- ✚ -Champs magnétiques puissants : cette catégorie concerne les moteurs, les générateurs, les transformateurs et les systèmes de stockage d'énergie.
- ✚ -Champ magnétique faible : Cette catégorie concerne les lignes de transport d'énergie, les -transformateurs et les limiteurs de courant. [18]

I.7.1. Machines tournantes :

Les supraconducteurs sont largement appliqués dans les machines tournantes dans diverses parties en raison de l'efficacité qu'ils procurent en termes de performances. L'application des supraconducteurs dans les refroidisseurs est une source de nombreux prototypes. Le remplacement des enroulements en cuivre par des enroulements supraconducteurs permet une augmentation de la masse grâce aux densités de courant élevées de le fil et la disparition du circuit magnétique. Le couple massique élevé de ces machines en fait une application intéressante pour les systèmes embarqués. [19]

I.7.2. Les Aimants permanents supraconducteurs:

Un supraconducteur surdimensionné peut également être utilisé comme aimant permanent dans les machines synchrones. basé sur le refroidissement Au champ zéro, où le supraconducteur est à une température critique élevée, puis nous l'exposons à un changement rapide de champ magnétique, il piègera le champ magnétique. Où le champ piégé dans le supraconducteur est lié aux courants induits selon la loi de Lenz. Ces courants se développent comme dans le métal ordinaire, à partir de la surface extérieure, mais contrairement aux matériaux résistifs, ils ne sont pas amortis car la résistance est nulle. Lorsque le champ extérieur diminue, la distribution du courant change pour s'opposer à cette nouvelle variance et tend à piéger l'extrapolation. [18]

I.7.3. Les transformateurs: [18]

L'une des applications des supraconducteurs en génie électrique concerne les transformateurs. Pour cette application, l'un des inconvénients majeurs est les pertes en courant alternatif des supraconducteurs. Les études menées ont montré de grandes performances pour ce type de transformateur. En effet, par rapport aux transformateurs traditionnels, les pertes peuvent être réduites de 30 %, le volume de 50 % et le poids de 70 %.

I.7.4. Limitation de courant :

Le fonctionnement des limiteurs supraconducteurs repose sur le passage de l'état supraconducteur à l'état naturel de ces matériaux. Cette transition en un temps très court fait des supraconducteurs de bons limiteurs. En cas de court-circuit dans le réseau électrique, le courant augmente rapidement et dépasse le courant critique du supraconducteur. Ce dernier, passant par l'état normal, s'aperçoit que sa résistance augmente, ce qui entraîne une limitation du courant de court-circuit. L'énergie dispersée dans le matériau supraconducteur après la transition est importante et peut conduire à la destruction du dispositif. L'avantage des limiteurs supraconducteurs par rapport aux dispositifs de protection conventionnels est leur temps de réponse rapide et leur capacité à être utilisés à des tensions très élevées. [18]

I.7.5. Câbles de transport :

Les pertes dans les supraconducteurs sont beaucoup plus faibles que dans les câbles conventionnels, et ils sont très utiles pour les applications de transmission de puissance. Cependant, le problème de la cryogénie est difficile à résoudre à long terme. Une solution consiste à faire circuler le liquide de refroidissement dans un tube au milieu du câble et à enrouler le fil supraconducteur autour de celui-ci. Certaines lignes électriques doivent être renforcées à mesure que la demande d'énergie augmente, mais l'espace requis pour poser de nouveaux câbles n'est pas toujours suffisant, de sorte que l'utilisation de supraconducteurs comme solution alternative résout le problème. [19]

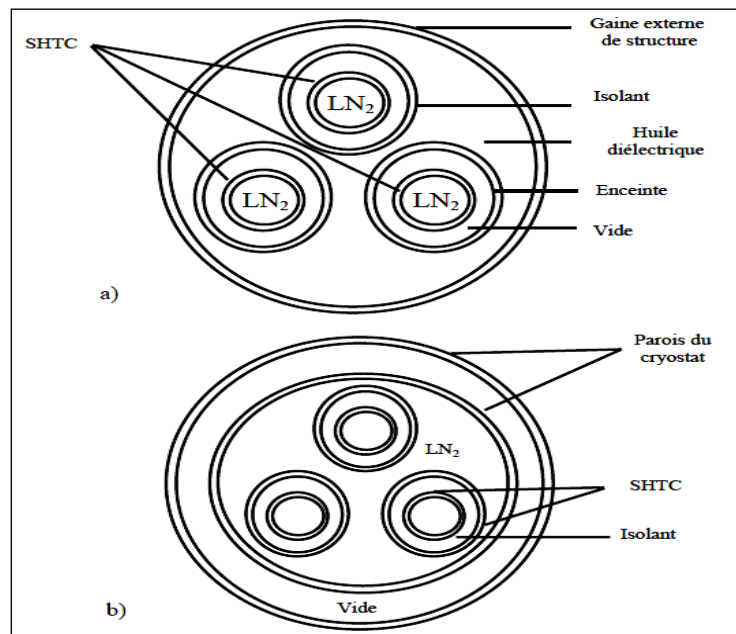


Figure I.22: Représentation schématique d'un câble triphasé en supraconducteur à haute Température critique (SHTC) refroidi à l'azote liquide (LN₂) :

- a) Chaque phase est dans une enceinte cryogénique et l'isolant est à température ambiante ;
- b) une seule enceinte cryogénique contient les trois phases ; chaque phase est formée de deux conducteurs concentriques, l'isolant se trouve à basse température [20-21].

I.7.6. Stockage d'énergie :

Le stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES) permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique ce qui résout parfaitement le problème du stockage d'énergie électrique, et cette dernière peut être récupérée avec un très bon rendement. Il fonctionne en

court-circuitant une bobine supraconductrice, permettant au courant de s'enrouler indéfiniment. Le SMES peut être utilisé comme réservoir d'énergie pour organiser les réseaux électriques, et peut également être utilisé comme source d'alimentation impulsionnelle pour les lanceurs électromagnétiques ou la modulation magnétique. [19]

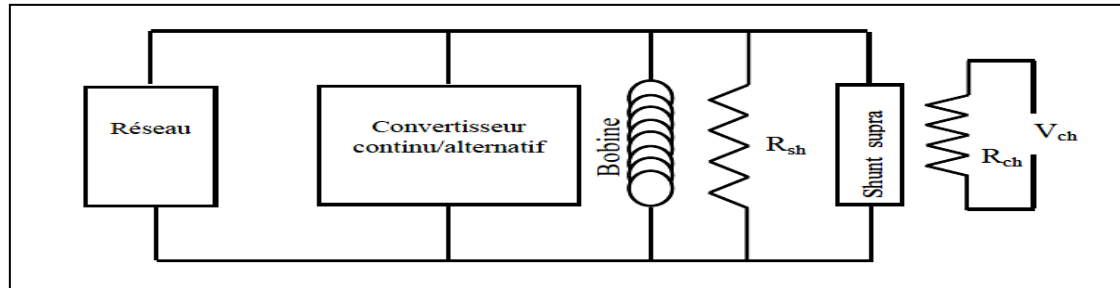


Figure I.23: Schéma de principe d'une bobine supraconductrice couplée à un réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur ; Rsh est la résistance de protection ; Rch et Vch forment le circuit de chauffage du shunt supraconducteur. [20-21]

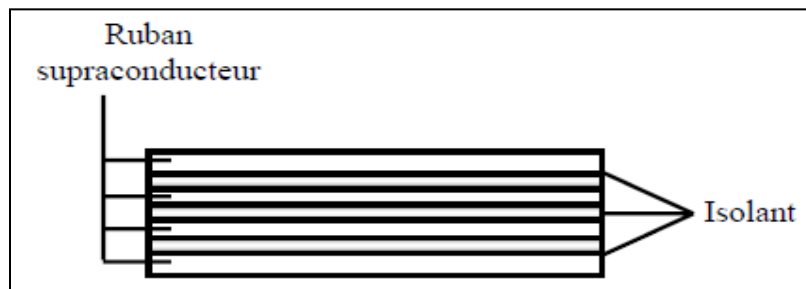


Figure I.24: Conducteur formé de 4 rubans supraconducteurs isolés les uns des autres.

[20-21]

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur les matériaux supraconducteurs, leurs caractéristiques et leurs applications. Les matériaux supraconducteurs ont certaines propriétés pour les contrôler. Nous distinguons deux types de supraconducteurs. Les supraconducteurs de type 2 sont les plus largement utilisés et appliqués en raison de la température, qui est faible en Type 1. Nous concluons que les supraconducteurs HTC sont le meilleur choix pour leur application dans diverses industries car ils peuvent améliorer les performances de nombreuses machines. La modélisation de ces matériaux fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 99

Modélisation

Des

Matériaux

Supraconducteurs

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous fournirons une modélisation détaillée des supraconducteurs afin d'identifier les différentes équations pour différentes grandeurs physiques et mathématiques liées à l'étude et à la modélisation des phénomènes électromagnétiques et thermiques dans les matériaux supraconducteurs à haute température critique et des équations aux dérivées partielles issues du formalisme de Maxwell.

La méthode des éléments finis a été adoptée comme méthode de résolution des équations différentielles traiter les propriétés partielles des phénomènes physiques, connaître les caractéristiques d'un matériau supraconducteur joue un rôle important dans la détermination de la taille du dispositif, afin de développer des applications des supraconducteurs dans de nouvelles industries.

Diverses méthodes de caractérisation dans le cas des supraconducteurs pour les mesures des propriétés de ce matériau, à savoir; Distribution et densité du courant électrique courant critique, la possibilité d'avoir un fort champ magnétique piégé, etc.....

Les résultats peuvent se varier selon la méthode de mesure choisie, car ils peuvent être testé à travers ces équations et modéliser avec plusieurs programmes tels que MATLAB FLUX2D. Nous allons rappeler les deux modèles de caractéristique E(J) qui représente un supraconducteur et les modèles de comportement.

II.2.Equations mathématiques régissent le phénomène physique

II.2.1.Relation B(H)

L'induction magnétique B à l'intérieur d'un matériau en fonction du champ externe H et de l'aimantation M est donnée par l'expression :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = (1+x) \mu_0 H = \mu_0 \mu_r H + \mu_0 M \quad (\text{II.1})$$

Nous avons vu qu'un supraconducteur était diamagnétique, c'est à dire que B est nul à l'intérieur du matériau, lorsque $H < H_{c1}$. Ceci entraîne que $M = -H$ et $x = -1$. En revanche, lorsque le champ H_{c1} est supérieur à H, le matériau supraconducteur n'est plus

diamagnétique. Comme le champ critique H_{c1} d'un supraconducteur de type II est de valeur faible, l'induction B auquel il est soumis lors de son utilisation est en général supérieure à μ_0 . Il peut donc être considéré comme macroscopiquement non magnétique.

On peut alors écrire $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ (Figure II.1), [22]

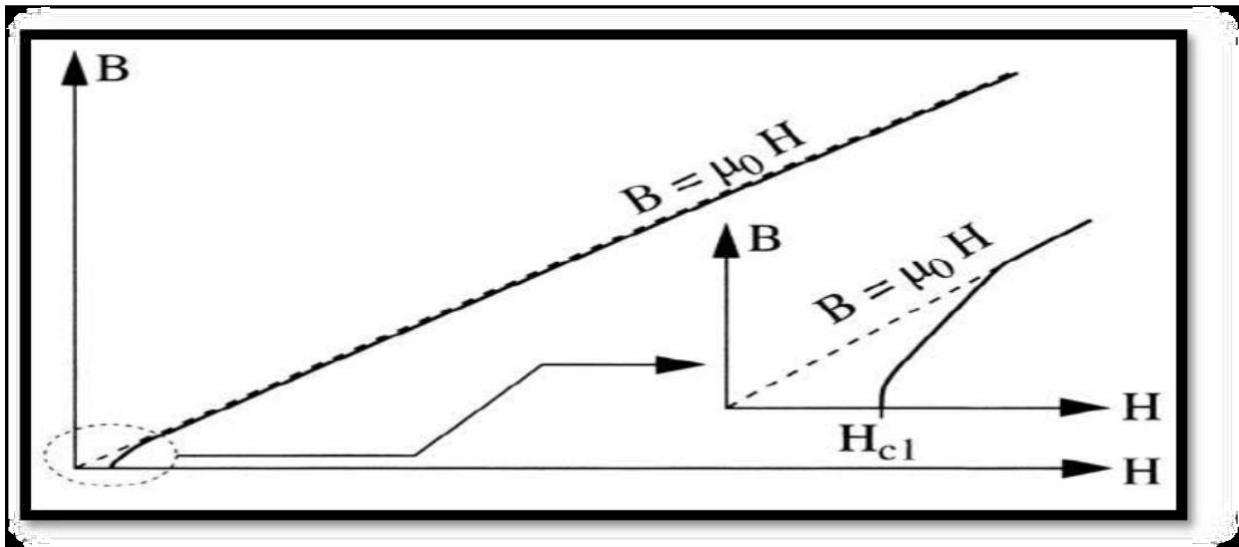


Figure II. 1 : Caractéristique B(H) d'un supraconducteur [22].

II.2.2.Relation E (J)

À partir de mesures courant-tension sur un échantillon, on peut déduire la caractéristique expérimentale $V(I)$ qui se met habituellement sous la forme d'une loi de puissance. Si l'on admet que cette caractéristique reste valable pour la densité de courant, la relation $E(J)$

s'écrit
$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \tag{II.2}$$

Dans l'équation (II.2), l'exposant « n » dépend non seulement du matériau, mais aussi de la température et de l'induction. Plus l'exposant n est élevé, et plus la transition est rapide (Figure II.2).

Le paramètre n est parfois considéré comme un indicateur de la qualité d'un ruban supraconducteur : plus il est élevé et plus le matériau est d'excellente qualité. En effet, dans ce cas, le courant critique peut alors être déterminé sans ambiguïté dès lors qu'une tension apparaît aux bornes de l'échantillon.

La relation (II.2) peut être résolue au moyen d'un programme informatique afin de déterminer les grandeurs électromagnétiques. Analytiquement, elle devient cependant difficilement utilisable, sauf dans le cas où « n » est grand. [23]

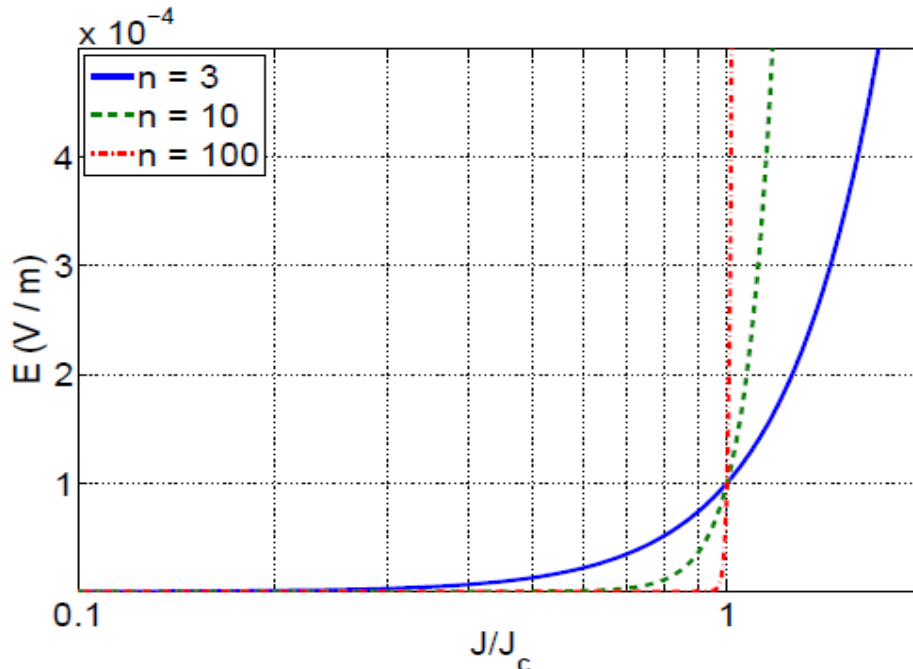


Figure II. 2 : Caractéristique $E(J)$ d'un supraconducteur. [23]

II.3. Les Modèles de comportement :

II.3.1. Modèle de l'état critique ou le modèle de Bean :

C'est le modèle le plus classique qui stipule qu'à une température donnée la densité de courant dans un supraconducteur est soit nulle, soit égale à la densité de courant critique J_c . Le supraconducteur est considéré comme non magnétique.

$$J = J_c(|B|) \frac{E}{|E|} \quad (II.3)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

D'un point de vue plus mathématique, on traduit ces expressions avec les équations de Maxwell :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \pm \mu_0 \vec{J}_c \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \vec{0} \quad (II.4)$$

Le modèle de Bean (1962) suppose, en plus, que la densité de courant critique est indépendante de la valeur de l'induction magnétique B. [24]

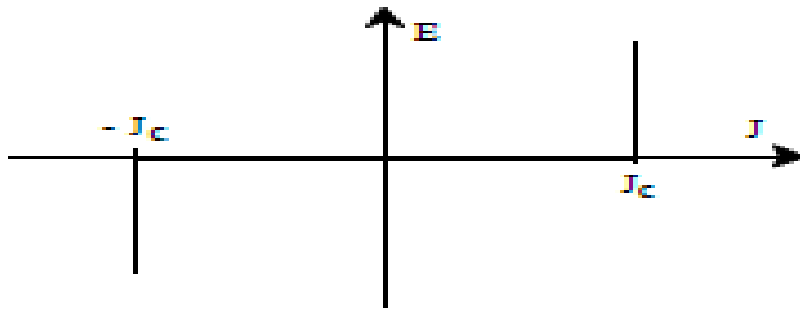


Figure II. 3 : Caractéristique E(J) basée sur le Modèle de Bean [24]

Ce modèle a l'avantage d'être assez simple mathématiquement et permet pour des géométries simples, d'avoir des expressions analytiques et d'étudier les grandeurs importantes pour les pertes A.C. par exemple. Cependant, la discontinuité de ce modèle le rend peu utilisable pour des développements numériques ; de plus, il ne reflète pas toujours de façon satisfaisante le comportement des supraconducteurs. [24]

II.3.2.Modèle de KIM

Le modèle de Bean ainsi que la loi en puissance considèrent le matériau supraconducteur isotrope et isotherme. Ils ne tiennent pas compte de l'échauffement éventuel du conducteur sous l'effet des pertes qui entraînerait une diminution du courant critique. Dans le modèle de Bean, la densité de courant critique est supposée constante quel que soit le champ magnétique extérieur. Dans la réalité la densité de courant dépend fortement de son orientation par rapport au champ et de l'induction magnétique, B. Une expression de $J_c(B)$ dans le cas isotrope a été donnée par Kim et al.

$$J_c(|B|) = \frac{j_{c0} B_0}{|B| + B_0} \quad (\text{II.5})$$

C'est le modèle le plus utilisé pour la modélisation de la dépendance de la densité de courant critique avec l'induction magnétique. [26]

II.3.3. Modèle de Flux Flow et Flux Creep [22]

Nous pouvons définir deux modes de fonctionnement pour le supraconducteur, selon la valeur de la densité de courant critique J_c :

- Si $|J| \leq J_c$, 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 »,

$$E = 2\rho_c J_c \sinh\left(\frac{U_0 J}{K\theta J_c}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{K\theta}\right) \quad (\text{II.6})$$

K : Constant de Boltzmann.

θ : Température.

ρ_c : Résistivité de Flux Creep.

U_0 : Potentiel de profondeur.

- Si $|J| > J_c$, 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 ».

$$E = \pm (E_c + \rho_f J_c \left(\frac{|J|}{J_c} - 1\right)) \rho_f \quad (\text{II.7})$$

ρ_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 E_c . [22]

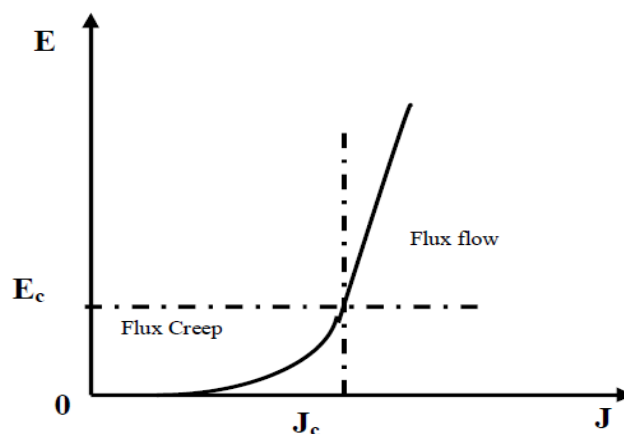


Figure II. 4 : Modèle de Flux Flow et Creep [22]

II. 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 [26]. Les équations se découplent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons : le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique, magnétodynamique.

II. 4.1 : Modèle électrostatique [26]

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas de temps (régime stationnaire : cas de courant continu) de ce fait le champ magnétique créé ne varie pas dans le temps.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \quad (\text{II.8})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.9})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0} \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

On a :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

(II.12)

Le modèle se ramène alors à l'équation

$$\text{div} (\varepsilon \overrightarrow{\text{grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{II.13})$$

II. 4. 2 Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent [27] :

II. 4. 2.1 Modèle magnétostatique scalaire : [26]

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

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{0} \quad (II.14)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (II.15)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (II.16)$$

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

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$Div (\mu \overrightarrow{grad} \Phi) = 0 \quad (II.17)$$

II. 4. 2.2 Modèle magnétostatique vectorielle :

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

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (II.18)$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (II.19)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (II.20)$$

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

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (II.21)$$

D'où le système d'équation :

$$\overrightarrow{rot} (\nu \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{j} \quad (II.22)$$

II. 4.3 Modèle magnétodynamique : [26]

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 vecteur induction magnétique est non nul, ainsi, les champs électrique et magnétique sont alors couplés par la présence des courants de Foucault. [27]

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 choisit la formulation en champ électrique \vec{E} . [26]

En termes d'équations, nous avons :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.23})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.24})$$

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

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

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

(II.26)

En prenant le rotationnel :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\overrightarrow{\text{rot}} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.27})$$

Remplaçant l'équation (II.25) dans (II.27), on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\overrightarrow{\text{rot}} \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} = -\frac{\partial \overrightarrow{\text{rot}} \mu \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{II.28})$$

On considère μ constante dans le temps, d'où l'équation précédente devient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \overrightarrow{\text{rot}} \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{II.29})$$

Finalement on obtient :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$\text{div} \vec{E} = 0 \text{ (pas de charge)}$$

On a:

$$\Delta \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (\text{II.31})$$

Où :

$$(\text{div} \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{E} = \mu \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (\text{II.32})$$

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous concluons que la modélisation des dispositifs supraconducteurs nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques et des équations mathématiques afin d'analyser et d'étudier la possibilité de leurs applications dans la réalité. La connaissance du champ électromagnétique permet d'accéder au calcul des performances générales et au détail des conditions de fonctionnement de tout dispositif supraconducteur, quel que soit le système. L'étude d'un aimant supraconducteur, son implémentation et de voir son influence sur les caractéristiques de la nouvelle structure -Machine synchrone à aimant supraconducteur- (MSAS) fera l'objet du troisième chapitre.

CHAPITRE 999

Etude d'une Machine

Synchrone

A aimant

Supraconducteur

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons montrer une brève présentation de la machine synchrone à aimant permanent, son fonctionnement et de ses composants.

D'autre part, nous présenterons la machine synchrone supraconducteur et ses caractéristiques, ainsi que ses composantes l'induit et l'inducteur, Transmission de couple « Torque Tube » et Bobines HTC, ainsi qu'un aimant supraconducteur et la machine synchrone à aimants supraconducteurs et des réalisations de machines à aimants supraconducteurs, où les dimensions des moteurs qui ont été effectivement appliqués ont été présentées, avec plusieurs caractéristiques de chaque moteur et les conditions dans lesquelles ils ont été appliqués..

L'objectif principal de ce chapitre sera de présenter une comparaison entre les machines à aimants supraconducteurs et les machines à aimants permanents par la méthode des éléments finis au niveau de la machine et l'aimant aussi. Pour ce faire, nous allons remplacer l'aimant permanent par l'aimant supraconducteur par FLUX2D et SIMULINK sous MATLAB. Nous choisirons les deux logicielles afin d'étudier les différents aspects de la machine, vitesse, courant, champ magnétique, énergie et la puissance actif, les pertes joules et la perméabilité la densité de flux et d'énergie magnétique dans la machine.

Les résultats obtenus par FLUX2D et MATLAB seront indépendants l'un de l'autre, car par MATLAB, nous étudierons la machine synchrone en repère (d, q) direct et quadratique afin d'obtenir les différentes courbes; à savoir celle du courant I_d , I_q et la vitesse, ce qui étaient relativement difficile à étudier à l'aide de FLUX2D. Ce dernier nous permettra d'obtenir des résultats plus détaillés soit au niveau de l'ensemble de la machine, soit plus précisément au niveau de l'aimant lui-même, où la machine sera étudiée et intégrée avec ses différents matériaux et composés dans la repère triphasé (a,b,c) . **Tandis que par** MATLAB, la machine était intégrée avec des équations par schéma de bloc de simulation qui comporte beaucoup des hypothèses simplificatrices.

Enfin, nous prendrons des notes sur les différents résultats obtenus.

III.2. La machine synchrone à aimant permanent (MSAP):

Les machines dans lesquelles la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator sont appelées machines synchrones. Dans ce processus, le champ magnétique tournant est créé soit par un aimant, soit par un circuit d'excitation. Ensuite la position du champ magnétique tournant par rapport au rotor est fixe, ce qui force la synchronisation entre le champ rotor stator et le rotor, la vitesse de rotation du champ rotor est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à l'impulsion des courants statoriques dans la machine synchrone. [28]

III.2.1. Structure de la machine synchrone à aimant permanent:

Les corps de machines synchrones à aimants permanents sont classés selon la disposition des aimants sur le rotor. Ses configurations incluent des machines à flux radial et à flux axial. Ils peuvent être actionnés par des courants sinusoïdaux ou des courants d'onde de choc. Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique qui a la propriété d'avoir une aimantation pratiquement constante en l'absence d'un champ magnétique relativement important. Cette aimantation provient de dipôles magnétiques qui, dans ce matériau, sont constitués de combinaisons de moments orbitaux et de spins électroniques. Les matériaux des aimants permanents sont à base de fer, d'aluminium et de nickel avec des ajouts de cobalt, de cuivre ou de titane. Il peut être anisotrope. Les machines synchrones deviennent compétitives par rapport aux machines asynchrones, elles couvrent une très large gamme de puissances dans les systèmes d'entraînement, allant de quelques centaines de watts à plus. [29]

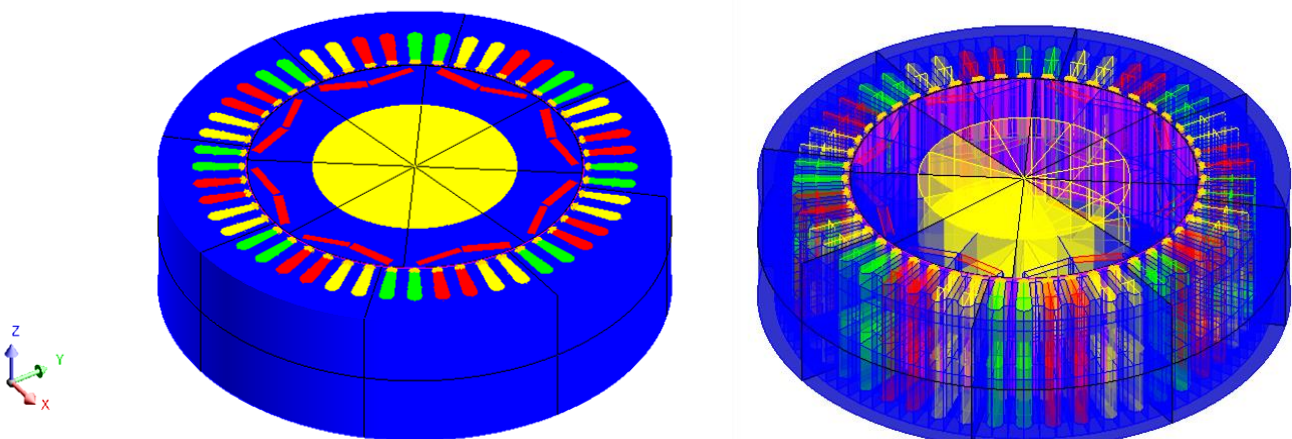


Figure III.1: Modèle 3D d'une machine synchrone à aimant permanent .

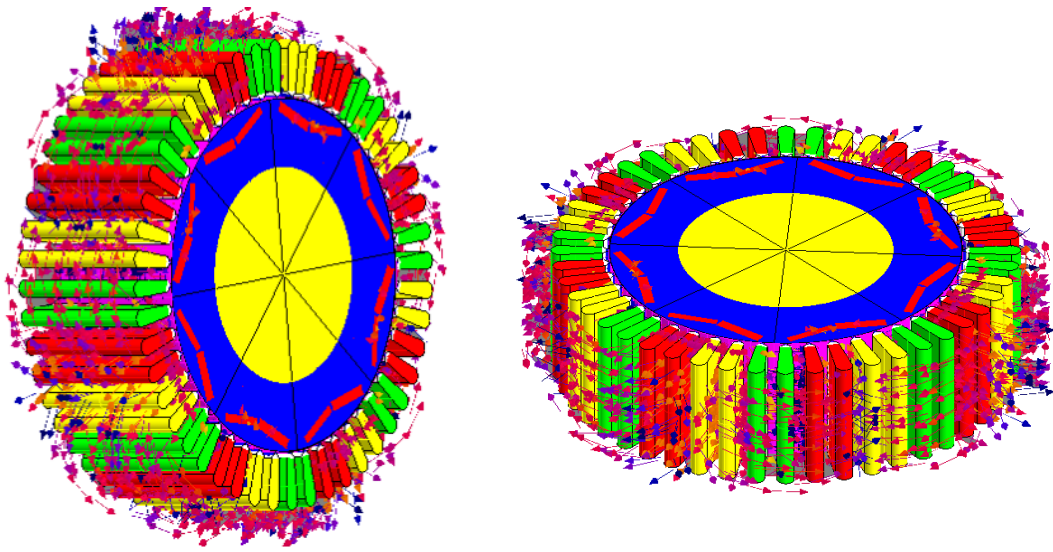


Figure III.2: Modèle 3D de Diagramme vectoriel de la densité de flux magnétique dans la machine synchrone à aimant permanent.

III.2.1.1. Le stator:

Les machines synchrones triphasées à stator, qu'elles soient à arbres ou à arbres lisses, ont le stator de trois enroulements identiques, décalés électriquement de 120° dans l'espace. Lorsque les enroulements du stator sont alimentés par un système triphasé à tension équilibrée, un champ tournant est créé le long de l'entrefer. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à l'impulsion des courants statoriques . [28]

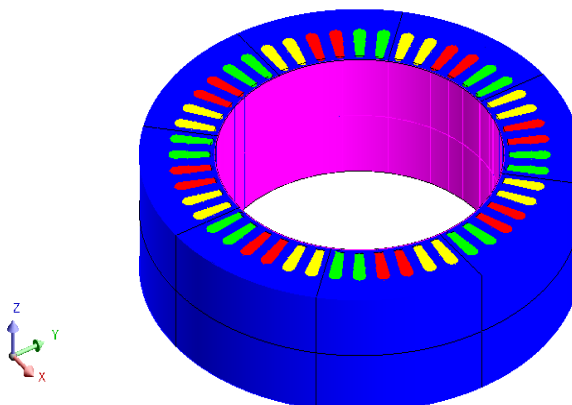


Figure III.3: Modèle 3D du stator d'une machine synchrone.

III.2.1.2. Le rotor:

Le rotor est la partie tournante de la machine. C'est un aimant permanent pour les petites machines et généralement un électroaimant sous la forme d'un énorme cylindre magnétique qui reçoit une bobine à courant continu (excitation) car il génère des paires alternées des pôles sud et nord. Il existe des rotors à pôles saillant avec un grand nombre de paires de pôles p , ou avec des pôles lisses. [28]

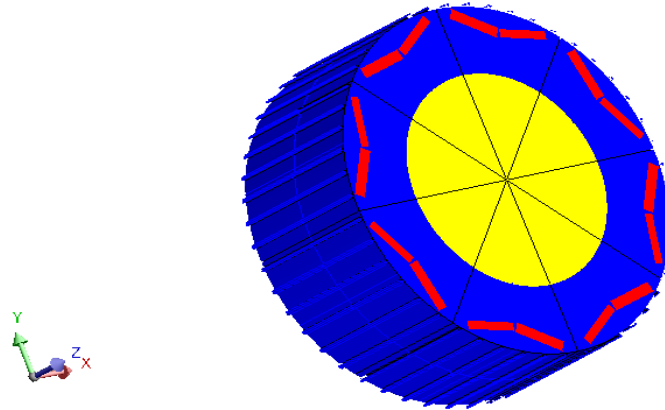


Figure III.4: Modèle 3D du Rotor d'une machine synchrone.

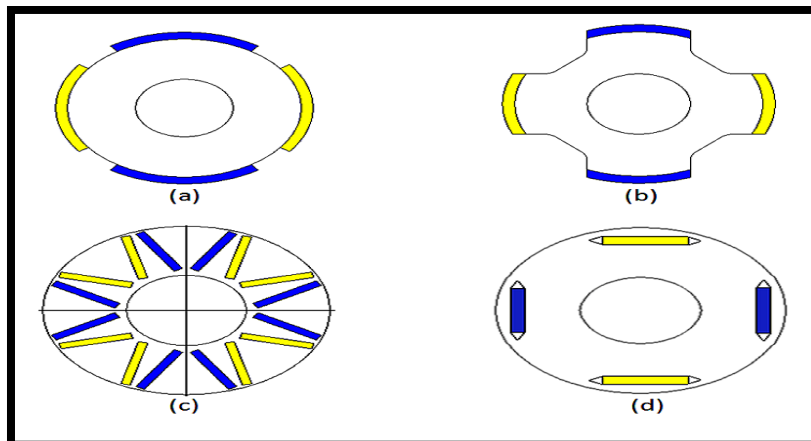


Figure III.5: Rotors de machines synchrones à aimants permanents. [30]

III.2.1.3. Les aimants permanents:

Les matériaux utilisés sont classés pour leurs propriétés magnétiques selon la largeur de leur cycle d'hystérésis représenté sur la (Fig. III.6) et ils forment deux grandes familles. Le premier est constitué par les matériaux magnétiques durs que l'on appelle généralement aimants permanents car leur aimantation ne varie pas sous l'influence d'un champ magnétique

extérieur, et le second est constitué par les matériaux magnétiques dits doux qui ne présentent des propriétés magnétiques qu'en présence de excitation externe. [31]

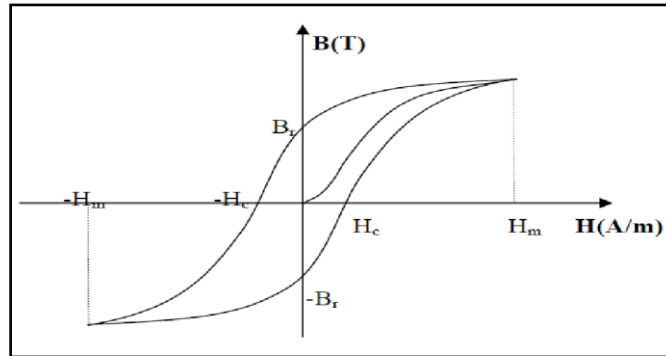


Figure III.6: Cycle d'hystérésis. [31]

Caractéristiques générales des aimants permanents l'état de fonctionnement d'un aimant se situe dans le deuxième quadrant de son cycle d'hystérésis .

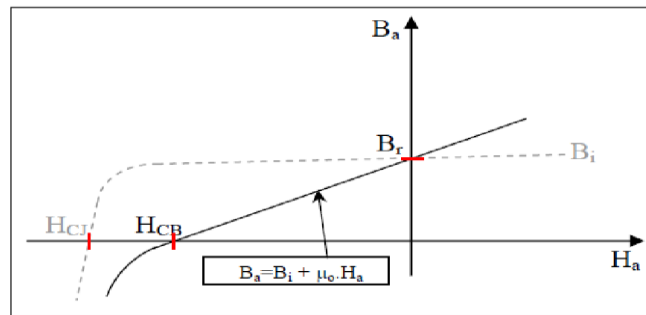


Figure III.7: Courbe de désaimantation. [31]

Les aimants permanents se caractérisent par de nombreux facteurs dans les applications industrielles :

- ✚ L'inductance résiduelle qui indique l'intensité potentielle de l'aimant et détermine la section normale nécessaire pour faire passer le flux utile pour maintenir le débit de l'entrefer. Le champ forcé est le champ magnétique capable d'annuler l'induction résiduelle et sa valeur est plus élevée car l'aimant est plus stable.
- ✚ Champ de polarisation forcée qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau et conduit à une démagnétisation complète et irréversible.
- ✚ Produit énergétique ($B.H$) : La valeur de l'énergie de l'aimant par unité de volume. Il est nécessaire de connaître les propriétés mécaniques, les propriétés physiques et

chimiques, ainsi que le point de Curie (température à laquelle un aimant perd ses propriétés magnétiques). [31]

III.3. Machines synchrones supraconductrices:

III.3.1. Principe fonctionnement:

Les moteurs supraconducteurs sont de nouveaux types de moteurs synchrones à courant alternatif qui utilisent des enroulements HTS (supraconductivité à haute température) au lieu des enroulements traditionnels en cuivre. Étant donné que le fil HTS peut transporter des courants beaucoup plus importants que le fil de cuivre, ces bobines sont capables de générer des champs magnétiques beaucoup plus puissants dans un volume d'espace donné.



Figure III.8: Moteur supraconducteur Sumitomo. [32]

Les machines synchrones supraconductrices sont actuellement fabriquées par des fils SHT de type BSCCO ou YBCO. L'armature de ses dispositifs doit être constituée uniquement de conducteurs en cuivre et l'inductance doit être un supraconducteur. Parmi les avantages de la machine supraconductrice figurent les pertes considérablement réduites dans l'agitateur et donc l'augmentation de l'efficacité de un à deux pour cent. Cette augmentation peut sembler marginale, mais dans certaines applications, comme l'exploitation pétrolière ou la compression de gaz, cela représente un gain énergétique avec un bénéfice potentiellement significatif. Aussi, l'un des avantages liés à la densité de courant élevée est la réduction de la taille des moteurs et des générateurs. On espère augmenter le couple de la masse ou la force de la masse d'un facteur au moins égal à deux. Les points critiques de la conception sont la transmission du couple et la réalisation du cryostat. En effet, il est nécessaire de relier les

parties froides, à une vingtaine de 20 K dans les réalisations récentes, aux parties chaudes, à température ambiante, en réduisant le flux de chaleur à l'intérieur de l'inducteur. [9]

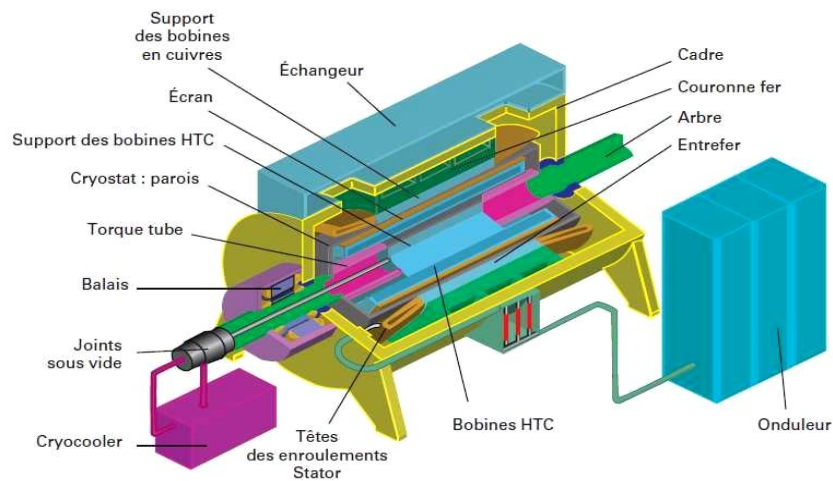


Figure III.9: Machine synchrone à élément supraconducteur HTC [33]

III.3.2. L'induit :

La conception de l'enroulement statorique non supraconducteur se fait de deux manières. Une bobine de cuivre à dents de fer classique est utilisée pour les générateurs SHTc avec un entrefer de 1,2 Tesla. Un autre type de bobinage dit : « bobinage pneumatique » est utilisé pour différentes versions de moteurs SHT de quelques mégawatts où les moteurs sont à fort couple et les moteurs sont à basse vitesse. L'utilisation de dents en fer n'est pas justifiée en raison de l'entrefer élevé. Ce stator se compose de : des dents composites non magnétiques qui maintiennent les conducteurs en cuivre et une couronne magnétique pour sceller la sortie. La Figure III.10 montre le stator de la machine supraconductrice de Siemens: 400kW-1500 tr/min. Le bobinage est constitué de fil de Litz, fixé autour d'une structure à base de fibre de verre G10 . [33]

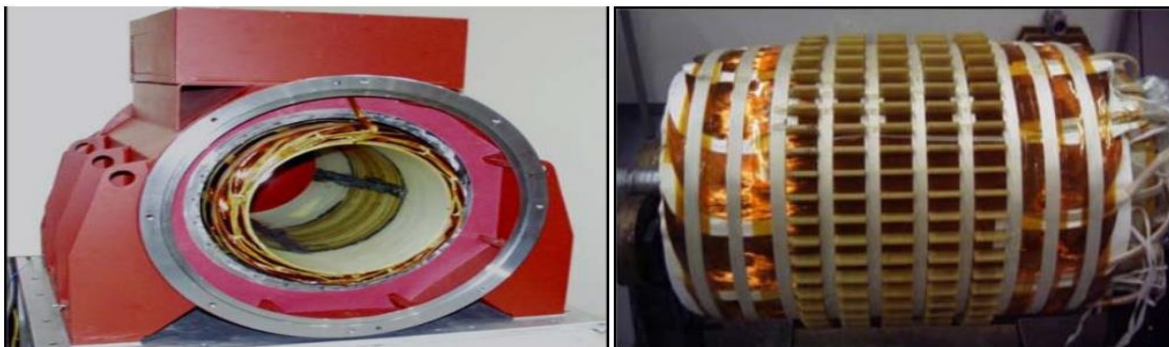


Figure III.10: Induit à air de la machine Siemens AG : 400kW-1500 tr/min . [9]

III.3.3. L'inducteur :

L'inducteur supraconducteur forme la partie froide du système, qui est refroidie à environ 25-30 K. Pour atteindre cette température de fonctionnement, un réfrigérateur frigorifique est utilisé, ainsi qu'un échangeur de chaleur et un système de circulation de gaz (fluorescent ou gaz hélium). La conception du rotor varie selon que le fer est utilisé ou non dans la partie froide. Les rotors dépourvus de noyau ferromagnétique sont appelés rotors pneumatiques, "rotors sans fer". Il est fait d'un matériau structurel non magnétique (généralement de la fibre de verre) plutôt que du fer utilisé comme support pour les bobines SHTc. [9]

III.3.4. Transmission de couple « Torque Tube » :

Les machines électriques synchrones à haute puissance fournissent un rotor supraconducteur avec un milieu de refroidissement rotatif. Afin de transférer le couple entre la partie froide à 30 K et l'arbre à température ambiante, des «torques tubes» de différentes formes ont été développés. Les pièces en composite de fibre de verre sont placées dans une isolation sous vide réduisant ainsi les pertes de conduction. [9]

III.4. Les aimants supraconducteurs pour la recherche:

Il existe des aimants destinés aux laboratoires, générant de nombreux Tesla. Il permet l'étude des propriétés physiques des matériaux sous l'influence de champs magnétiques. Ces aimants supraconducteurs sont utilisés pour étudier les inductions de supraconductivité de 31,35 Tesla, valeur obtenue en 1993 et cette valeur était le record mondial de cette année-là. Ces aimants supraconducteurs sont également utilisés en physique des particules : ils sont capables de diriger les particules et de les maintenir sur des orbites spécifiques, focalisant et refocalisant les faisceaux. D'autres aimants sont utilisés pour détecter les particules élémentaires émises lors des collisions dans les accélérateurs. Nous avons donc des aimants supraconducteurs tout le long du trajet des particules. [34]

III.5. Les Aimants supraconducteurs:

Les aimants supraconducteurs sont une alternative aux aimants permanents qui augmentent le champ magnétique généré par l'inducteur tout en conservant les avantages des aimants permanents traditionnels afin que ces machines puissent s'affranchir des câbles existants qui alimentent l'inducteur source de pertes de fluide caloporteur par conduction. [35]



Figure III.11: Aimant supraconducteur-Tous les fabricants industriels.[36]

Utiliser des aimants supraconducteurs capables de produire un champ magnétique très élevé, avant qu'il ne soit nécessaire d'étudier leur démagnétisation. Pour étudier l'effet d'un champ magnétique alternatif sur ces aimants supraconducteurs, une puce supraconductrice de type YBCO a été utilisée. Ce pastille supraconducteur est d'abord aimanté dans un circuit ferromagnétique similaire à celui d'un moteur électrique. Ensuite, un champ magnétique alternatif est appliqué aux pastilles de différentes amplitudes [37]. Il existe deux manières de concevoir un système permettant l'aimantation des pastilles supraconducteurs dans l'enceinte du rotor :

III.5.1. Le refroidissement de la pastille sous champ magnétique:

Processus de refroidissement des pastilles sous champ magnétique consiste à appliquer d'abord un champ magnétique de plusieurs Tesla aux pastilles, puis à les refroidir à une température inférieure à leur température critique T_c . La fonction de ce processus est principalement liée à l'amplitude du champ magnétique appliqué aux pastilles lors du refroidissement. [35]

III.5.2. Le piégeage impulsif :

Tout d'abord, les pastilles sont refroidies hors du champ, puis une très forte impulsion de champ magnétique est appliquée aux pastilles. Une fois l'impulsion terminée, la pastille supraconducteur a une inductance résiduelle. Par rapport à la technique de refroidissement par champ, cette méthode peut verrouiller une valeur d'induction magnétique plus élevée avec un

système de magnétisation plus compact. Cependant, la pulsation fait monter la température ce qui crée des pertes supplémentaires de fluide caloporteur et cela affecte les pastilles supraconducteurs. Les composants mécaniques du moteur sont exposés à de fortes contraintes mécaniques. La Figure III.12 est un exemple de machine électrique fonctionnant sur ce principe. Il représente une machine à flux axial de 16 kW à 760 produit et testé par KITANO®. Son inducteur est constitué de huit sphères supraconductrices de 84 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur refroidies à l'azote liquide avec (77 K). [35]

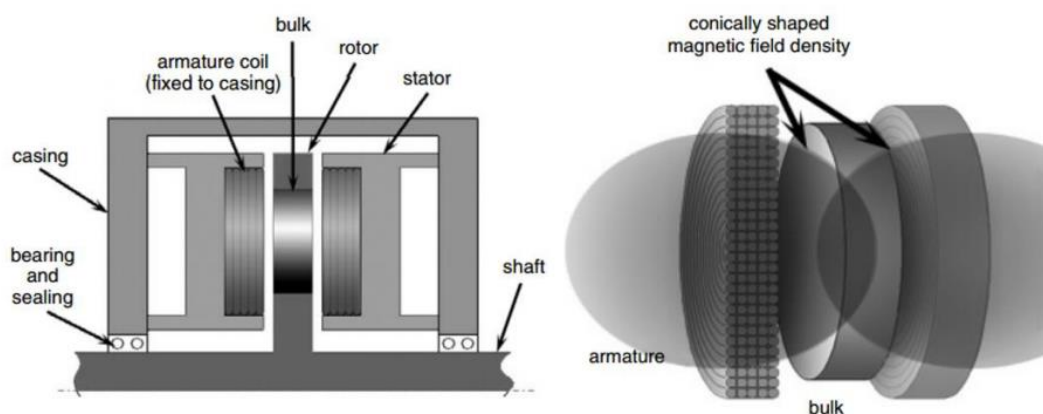


Figure III.12: Technique de magnétisation des pastilles supraconductrices. [38]

Il se compose globalement d'un rotor comportant des pastilles supraconducteurs, d'un dispositif fixe comportant des bobines concentriques de formes circulaires en cuivre et d'une série de bobines aimantées également en cuivre. Les bobines magnétisantes appliquent aux pastilles supraconducteurs une impulsion de durée 5,5 ms . sa valeur crête est à 1200 A, ce qui correspond à une inductance maximale appliquée au pastilles 4,5 T. Le champ magnétique résiduel généré par ce processus est de 1,04T. [35]

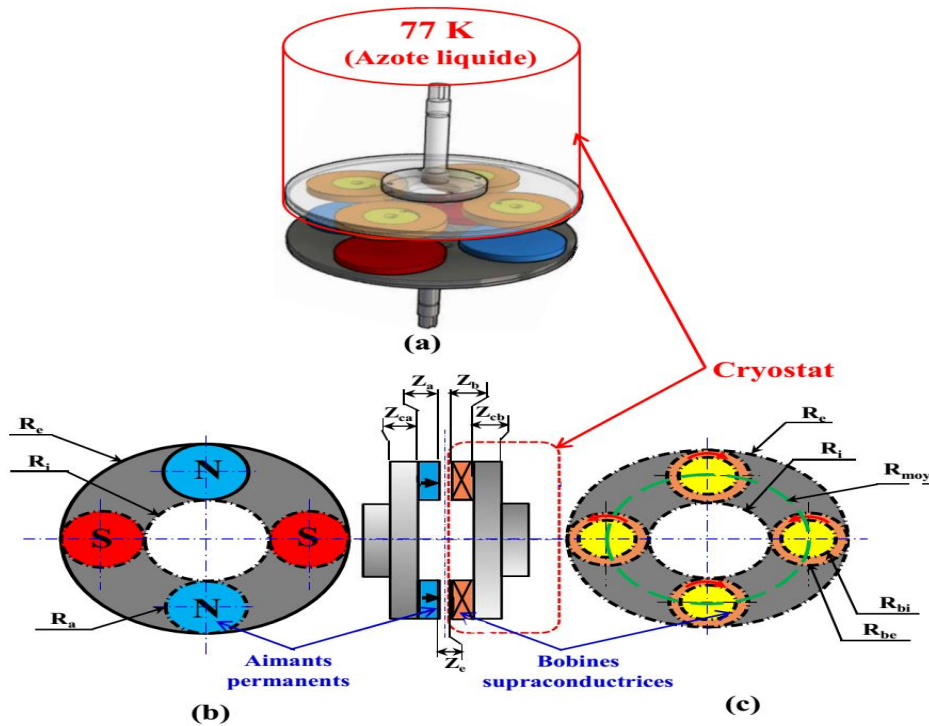


Figure III.13: Structure de l'accouplement supraconducteur (a) Coupe 3D de l'ensemble (b) Rotor à aimants permanents (c) Rotor avec bobines supraconductrices. [39]

III.6. Machines synchrones à aimants supraconducteurs:

Ce type de machine est utilisé dans des applications industrielles très exigeantes à forte intensité énergétique, Du fait de leur capacité à attirer des massifs supraconductrices à des valeurs bien supérieures à celle des aimants permanents, la principale difficulté de réalisation de ces machines est l'aimantation in situ. Le remplacement des aimants permanents par des aimants supraconducteur offre de nombreux avantages et une efficacité élevée, tels qu'une vitesse accrue, une puissance active, aucune perte, un meilleur couple et un transfert de courant plus rapide grâce aux supraconducteurs. La machine synchrone à aimant supraconducteur peut atteindre de meilleures performances que la machine traditionnelle avec moins de poids et taille de bloc inférieure à celle Ainsi, pour l'espace la technique du champ pulsé est préférée dans de nombreux cas. Cependant, une température élevée pendant les impulsions de champ magnétique est très préjudiciable aux propriétés des supraconducteurs. Pour cette raison, le champ piégé avec cette technologie aujourd'hui n'est guère meilleur que l'utilisation d'aimants permanents. [40]

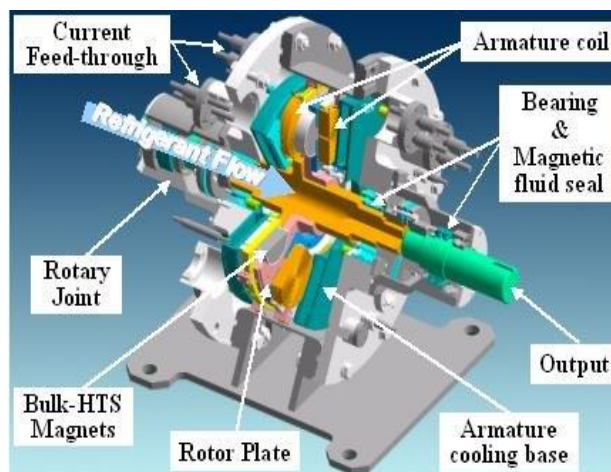


Figure III.14: Structure d'un moteur supraconducteur axial à aimants supraconducteurs réalisé au Japon. [41]

Tableau III.1: Quelques réalisations de machines à aimants supraconducteurs. [40]

	Pays	institution	Puissance /vitesse	type	remarque
1990-2000	JAP		0,94 kW	YBCO	<ul style="list-style-type: none"> •Machine à flux axiale •Champ magnétique pulsé •Les bobines magnétisantes sont placés autour des pastilles dans le cryostat. •Opération à 65-77 K
	JAP	UMST	10 kW 850 tr/min -16 kW 760 tr/min	GdBCO	<p>Propulsion marine</p> <ul style="list-style-type: none"> •Machine à flux axiale •Opération à 77 K •Champ piégé entre 1 T et 0,7 T
	JAP	CJR	1,5 kW 600 tr/min	YBCO	<ul style="list-style-type: none"> •Machine à flux radiale •Champ magnétique pulsé •Opération à 30 K •Champ piégé à la surface du cryostat de 0,3 T
2000-10	JAP	UMST	3,1 kW 700 tr/min	GdBCO	<ul style="list-style-type: none"> •Machine à flux axiale •Champ magnétique pulsé avec des bobines vortex •Les bobines qui magnétise sont gardées pour l'induit et placées à l'extérieur du cryostat. •Opération à 77 K •Champ piégé entre 0,5 T et 0,8 T
	JAP	UMST	3,1 kW 700 tr/min	GdBCO	<ul style="list-style-type: none"> •Machine à flux axiale •Champ magnétique pulsé avec des bobines vortex •Les bobines qui magnétise sont gardées pour l'induit et placées à l'extérieur du cryostat. •Opération à 77 K •Champ piégé entre 0,5 T et 0,8 T
2010-19	UK	Cambridge Université	7,8 kW 1500 tr/min	YBCO	<ul style="list-style-type: none"> •Machine à flux radiale •Champ magnétique pulsé •Opération à 77 K •Champ piégé à la surface du cryostat de 0,375 T

	JAP		30 kW 720 tr/min	GdBCO	Propulsion marine •Machine à flux axiale •Opération à 77 K • Puissance/Couple massique : 0,15 kW/kg – 2Nm/kg
	JAP	TUMSAT	30 kW 190 tr/min	YBCO	Propulsion marine •Machine à flux radiale •Opération à 30 K •Magnétisation par « Field Cooling »

UMST: University of Marine Science and Technology, CJR: Central Japan Railway

III.7. Modélisation de la MSAP :

III.7.1. Mise en équations de la machine dans le repère (abc) :

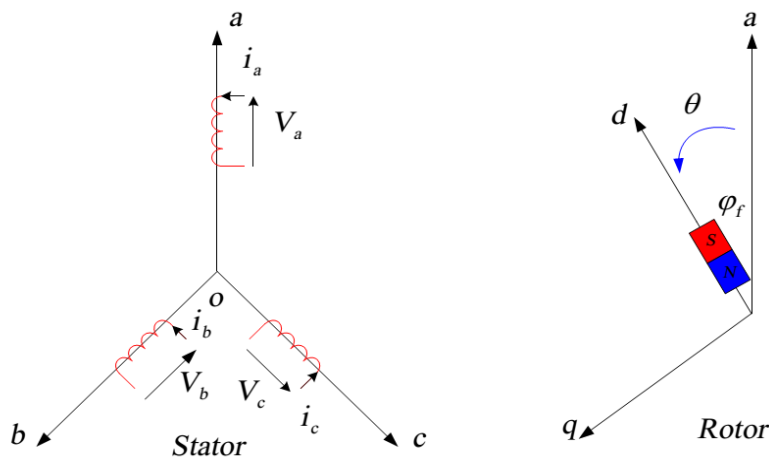


Figure III.15: Schéma de la MSAP dans le repère abc. [42]

III.7.1.1. Equations électriques :

$$[V] = [R_s][i] + \frac{d[\varphi]}{dt} \tag{III.1}$$

$[V] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$:Vecteur tensions statoriques.

$[i] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$:Vecteur courants statoriques.

$[\varphi] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$:Vecteur flux statorique.

$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$: Matrice de la résistance équivalente d'un enroulement statorique.

III.7.1.2. Equations magnétiques :

$$[\varphi] = [L_s][i_s] + [\varphi_f] \tag{III.2}$$

$[L_s] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix}$:Matrice d'inductance propre d'une phase statorique.

$[\varphi_f] = [\varphi_{af} \quad \varphi_{bf} \varphi_{cf}]^T$:Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

III.7.1.3.Equation mécanique :

L'équation mécanique s'écrit comme suite :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \tag{III.3}$$

$$C_f = f_c \Omega \tag{III.4}$$

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \tag{III.5}$$

- C_r : Couple résistant.
- C_{em} : Couple électromagnétique.
- C_f : Couple de frottement.
- J : Moment d'inertie.
- f_c : Coefficient de frottement.
- p : Nombre de paires de pôles.
- ω_r : Vitesse électrique du rotor.

III.7.2.Transformation De Park :

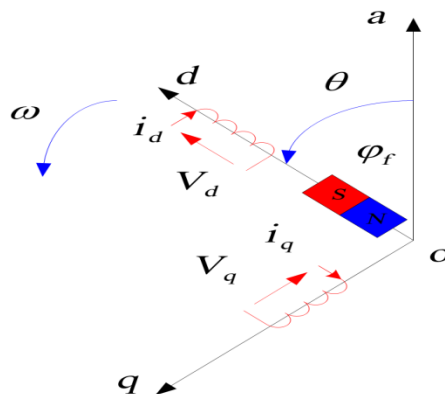


Figure III.16: Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q). [42]

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)][X_{abc}] \quad (\text{III.6})$$

$[P(\theta)]$:La matrice de passage direct de Park,

$[X_{abc}]$: :Représente les variables considérées de la machine (tensions, courants ou flux)

$[X_{dq0}]$:La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Dont la matrice inverse est la suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

III.7.2.1. Equations des tensions et des flux dans référentiel de PARK:

A partir de cette transformation, les équations s'écrivent comme:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \varphi_q$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \varphi_d \quad (\text{III.9})$$

$$\varphi_d = L_d i_d + \varphi_f$$

$$\varphi_q = L_q i_q \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant les expressions des flux φ_d et φ_q dans le système

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \varphi_f \quad (\text{III.11})$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (V_d - R_s + \omega_r L_q i_q)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - R_s i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \varphi_f) \quad (\text{III.12})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\varphi_f}{L_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Le couple électromagnétique est exprimé par la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor comme suit :

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta} \quad (\text{III.14})$$

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante:

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (\text{III.15})$$

En remplaçant, V_d V_q par leurs expressions on aura

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right] \quad (\text{III.16})$$

$\frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2)$: représente la puissance dissipée en pertes Joules dans les enroulements du stator.

$\left(\frac{d\varphi_d}{dt} i_d + \frac{d\varphi_q}{dt} i_q \right)$: représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator

$(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$: représente la puissance électromagnétique.

$$P_e = C_{em} \omega_r \quad (\text{III.17})$$

Il vient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{III.18})$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants est comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_q i_d + i_q \varphi_f] \quad (\text{III.19})$$

III.8. MODELISATION ET SIMULATION DE LA MSAP:

III.8.1. Paramètres de la machine étudiée:

Tableau III.2: Paramètres de la machine.

Paramètres de la machine	Valeurs
Résistance d'un enroulement	$R = 1.4 \Omega$
Inductance direct	$L_d = 6.6 \text{ mH}$
Inductance quadratique	$L_q = 5.8 \text{ mH}$
Nombre de paires de pôles	$P = 8$
Frottement	$F = 0.0003881$
Flux	$\text{PHI} = 0.1546 \text{ Wb}$
Moment d'inertie du groupe:	$J = 0.00176 \text{ kg.m}^2$

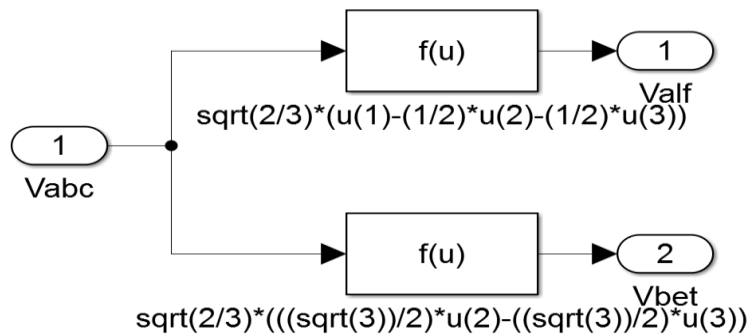


Figure III. 17 : Transformation triphasé à biphasé

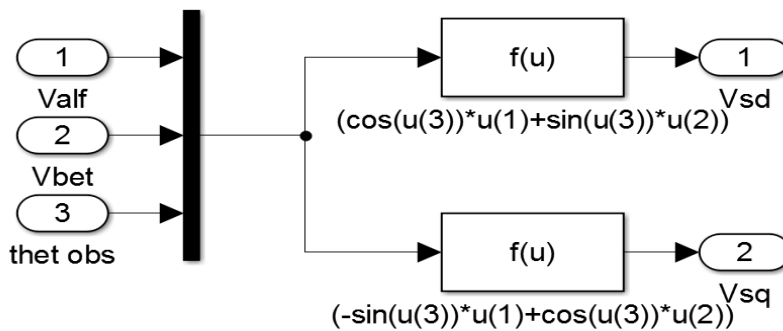


Figure III.18: Transformation biphasé a biphasé

III.8.2. Résultats de simulation sous MATLAB:

III.8.2.1. Les courbes:

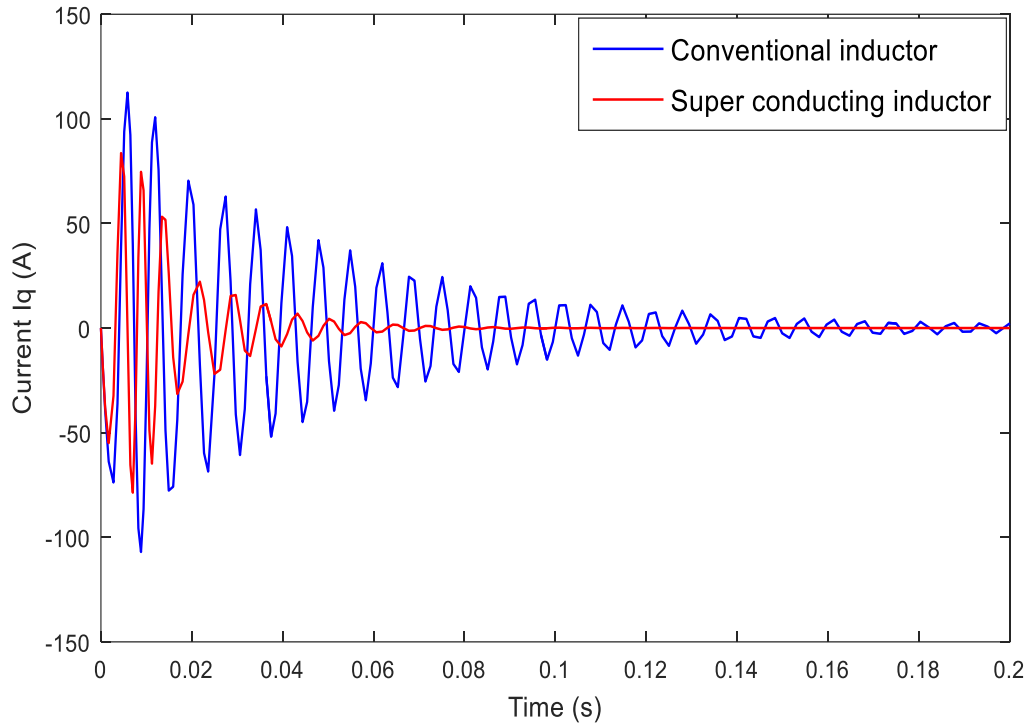


Figure III.20: Variation du courant I_q en fonction de temps.

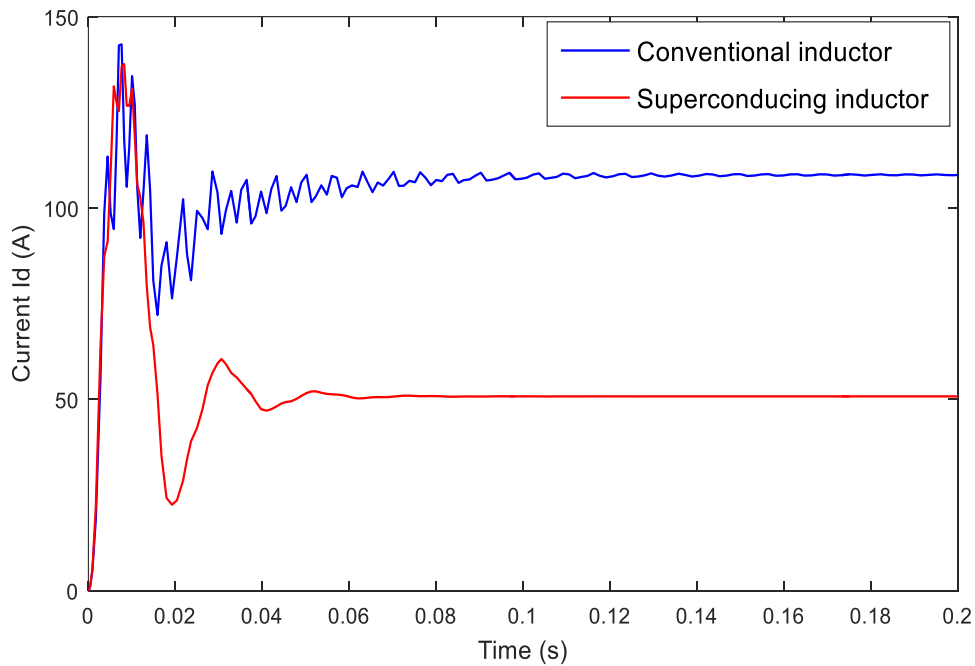


Figure III.21: Variation du courant I_d en fonction de temps.

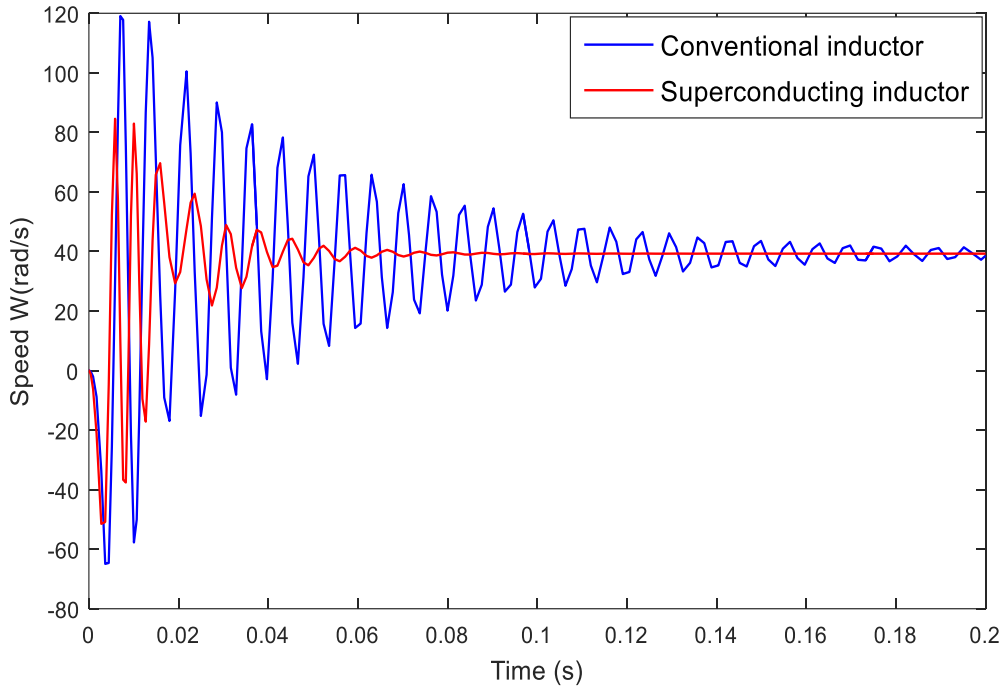


Figure III.22: Variation de vitesse W en fonction de temps.

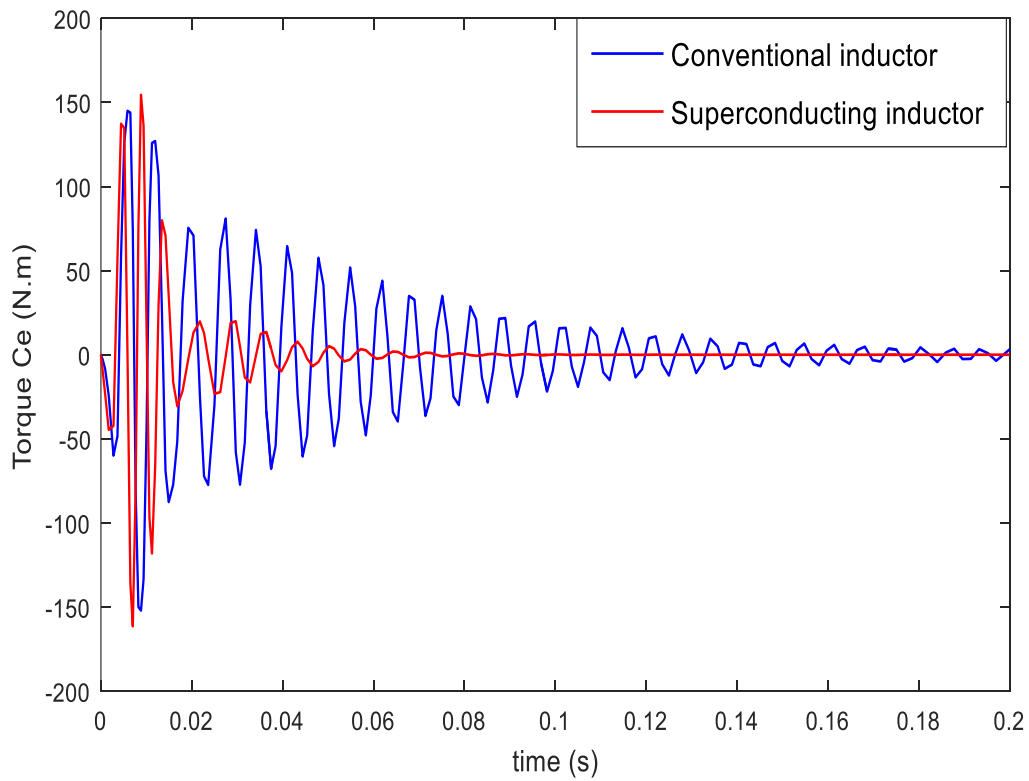


Figure III.23: Variation du couple électromagnétique CE en fonction de temps.

III.8.2.2. Interprétations des résultats:

On remarque sur les courbes présentées, qu'il y a une grande différence entre la machine conventionnelle et la machine synchrone à aimant supraconducteur, comme on le voit lorsque l'aimant permanent est remplacé par un supraconducteur, la période transitoire est réduite et l'accès au système de synchronisation plus rapide:

- Quant à la vitesse, on remarque que le moteur supraconducteur au démarrage consomme beaucoup moins d'énergie que le moteur conventionnel. Il génère une diminution de la période transitoire à 0,02 seconde. Il oscille légèrement pour que la vitesse de rotation du moteur se stabilise et atteigne le régime synchrone après un temps très court par rapport au moteur traditionnel, ce qui signifie que le moteur peut être démarré en peu de temps et obtenir les mêmes performances qu'un moteur synchrone à aimants permanents, mais avec moins consommation de puissance et une réduction significative du bruit au démarrage.
- On note également la valeur du couple électromagnétique $C_e=f(t)$ présente aux premiers instants de démarrage des battements importants dans un intervalle de temps court avec un pic de 157 N.m au démarrage après le remplacement par un aimant supraconducteur. Il passe de l'état transitoire en 0,1 seconde, puis tendre vers le régime ou le couple s'annule, réalisant ainsi une synchronisation dans une période très rapide par rapport à la machine traditionnelle et donc une augmentation en vitesse.
- On constate, au démarrage, le courant I_q se stabilise en un temps court de 0,1 s et la durée du régime de transition est fortement réduite et atteint le régime permanent au temps très court par rapport à le moteur synchrone à aimant permanent.
- D'après les courbes au démarrage, on voit que les valeurs de courant I_d dans la machine conventionnel et supraconducteur sont similaires à l'état transitoire, mais le moteur supraconducteur est plus rapide pour atteindre le système de synchronisation mais sa valeur diminue en raison de la perte de courant alternatif dans les enroulements du stator peut être un gros problème pour les machines supraconductrices.

III.8.3. Résultats de simulation sous FLUX2D:

La MSAP proposée à une puissance de sortie de 850 kW à 1200-1500 tr/min et à 8 pôles et 48 fentes, dans lequel l'aimant permanent est situé à l'intérieur du noyau du rotor. Le tableau III.3 donne les caractéristiques générales du moteur et l'aimant permanent NdFeB. En outre, un enroulement en épingle à cheveux avec une section transversale rectangulaire est utilisé pour améliorer le facteur de remplissage de la bobine.

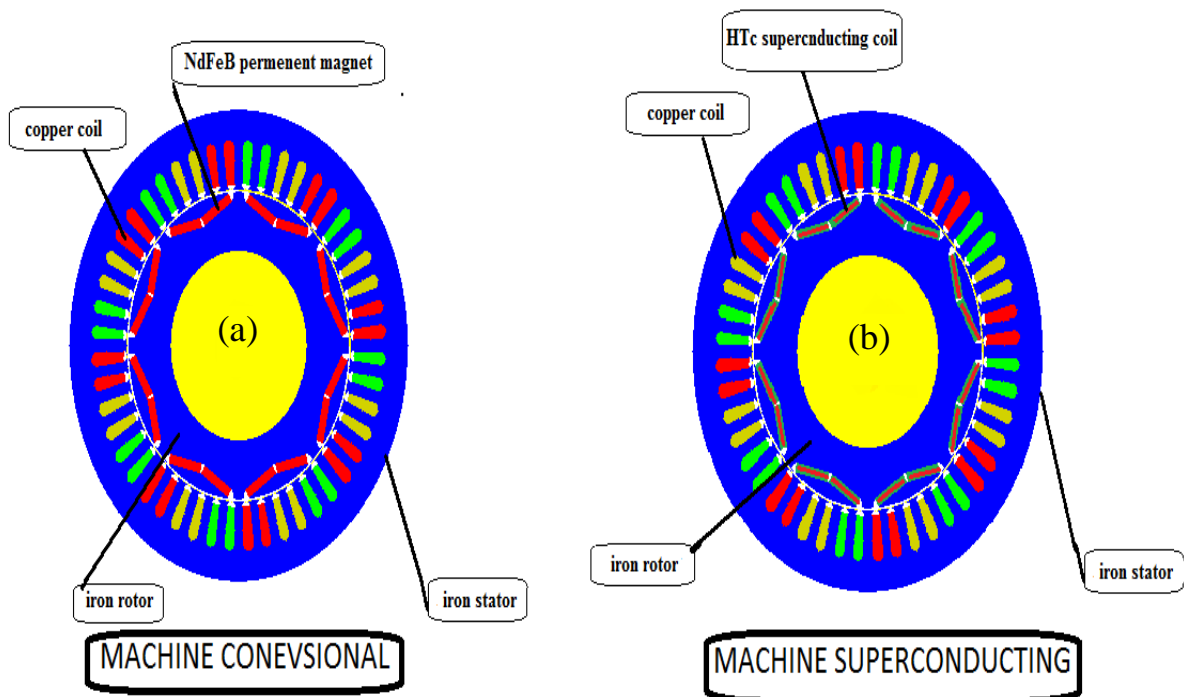


Figure III.24: Comparaison entre une machine conventionnelle (a) et supraconductrice (b).

III.8.3.1. Géométrie :

Cette géométrie contient la description de la géométrie et du maillage du moteur présenté de manière moins détaillée. L'utilisateur doit avoir une bonne compréhension de toutes les fonctionnalités du préprocesseur FLUX comme on voit dans la figure III. 25.

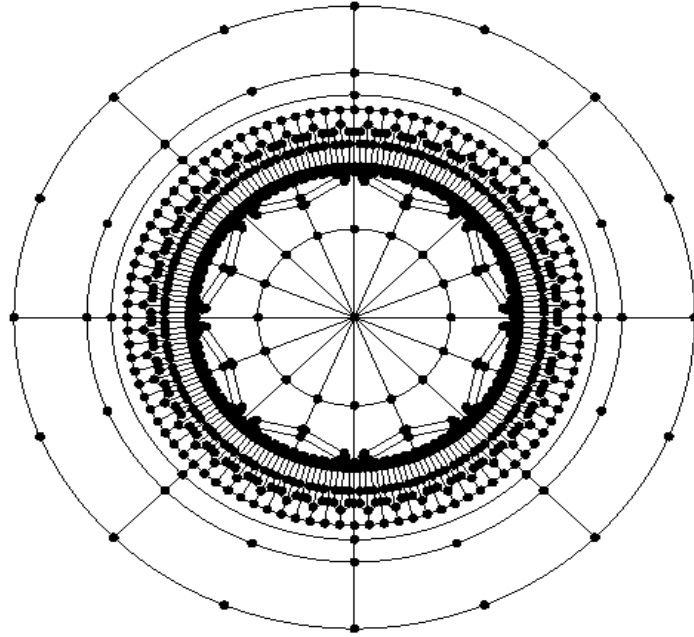


Figure III.25: Géométrie de machine MSAP dans FLUX 2D.

Tableau. III.3: Paramètres de la géométrie étudiée:

	Paramètres	Valeurs
machine	Max bus voltage	500 v
	Peak torque	400 N.m
	Max speed	6000 rpm
	Peak power rating	50 kW at 1200-1500 rpm
général	Length Unit *	Millimètre
	Mesh Density	0.5
	Inner radius	110
	Outer radius	140
	With shaft	Yes
gap	Airgap (GAP)	0.6
	Excentricities and Periodicities	Without excentricity
	Use Periodicities	Yes
	Rotating Airgap	Two layers airgap
rotor	Magnet shape	Rotoripm
	Shaft radius (RadSH-1)	56
	Thickness of magnet (LM) "	5
	Magnet pole arc (BetaM) [Deg] "	140
	Number of magnets blocks per pole (Nmbp)*	1
	Number of poles (POLES) *	8
	Rotor external radius (rad1) =	92
	Rotor shift angle (RotorAng)[Deg] *	0.0
magent	magnet type	Type4
	(Web)	10
	Magnet Width per pole (MagWid)	54
	bridge	1.0
	Depth of pole cap (ipmHq)*	10
	Radial web length (IWeb) =	2.75
	Width of gutter or slot inboard of magnets (gutter)	0.0
	Hub width (d0)	24.0
	Magnet inset (inset) *	0.0
stator	LamShap	Circle
	Stator outer radius (RAD3)	141.0
	Slot shape	StatorRound
	Slot opening (SO)*	2.0
	Radial depth (TGD) *	1.0
	Slot depth	30.0
	Tooth width stator (TWS) *	6.5
	Slot Opening angle (SOANG) [Deg] *	40
	Tooth fillet radius near stator slot opening (FILSO)	1.0

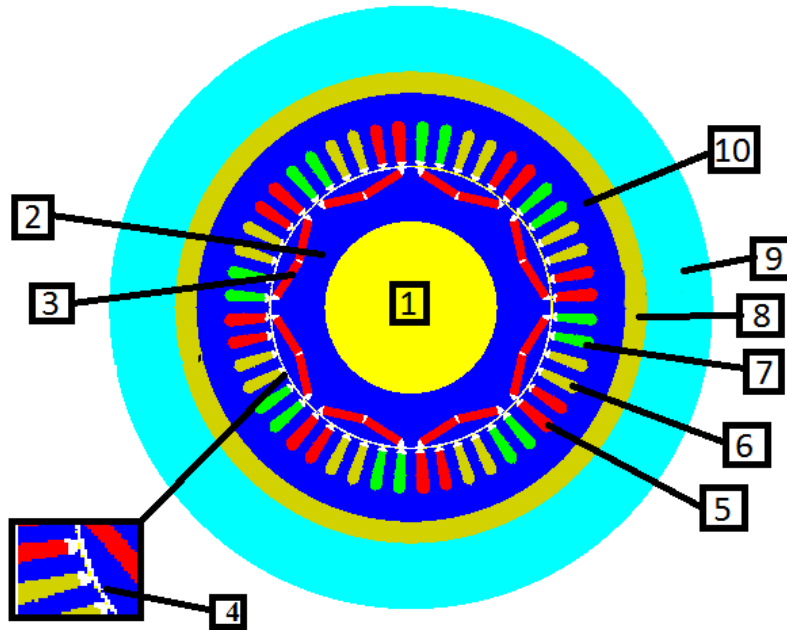


Figure III.26: Affectation de régions surfaciques.

Tableau. III.4 : Caractéristique de chaque région surfacique.

N	NOM	Commentaire	matériaux	L'ensemble mécanique
1	SHAFT	L'arbre	Air aux vide	mouvement
2	ROTOR	Partie mobile	M270-35A	mouvement
3	MAGNET	Aiment permanent	NdFeB	mouvement
4	ROTOR AIR	Air aux vide	Air aux vide	entrefer
5	PHASE POS 1	Air aux vide	Air aux vide	Fixe
6	PHASE POS 2	Air aux vide	Air aux vide	fixe
7	PHASE NEG 3	Air aux vide	Air aux vide	fixe
8	AIR STATOR	Air aux vide	Air aux vide	fixe
9	INFINITE	Air aux vide	Air aux vide	fixe
10	STATOR	Partie fixe	M270-35A	fixe

III.8.3.2. Création des matériaux:

Les aimants permanents sont de type NdFeB. Dans notre modélisation le stator et le rotor de la machine étudiée sont en matériau magnétique de type M270-35A. Sa caractéristique de magnétisation $B(H)$, Le tableau III.6 énumère les spécifications du modèle initial des aimants permanent NDFEB et supraconducteur HTC (YBCO).

Tableau. III.5 : La machine classique :

B(H) linear magent described in Br modele		
Name	Remanent flux density	Relative permeability
NDFEB	1.2	1.05
J(E) electrical proprty isotropic resistivity		
Name	Résistivity (ohm.m)	
NDFEB	1.4e-6	

Tableau. III.6 : La machine supraconductrice:

B(H) linear magent described in Br modele						
Name	Remanent flux density	Relative permeability				
YBCO	1.2	1E-6				
J(E) electrical proprty isotropic superconductivity (power Law)						
Name	Refrence value of Exponet n0	Temperature	unit	Rho at origin	Critical electric field EC(v/m)	Refren ce value of Critical current density Jc0 (A/M M**2)
YBCO	10	77	kelvin	1E-14	1E-4	4.4E6

III.8.3.3. Création de circuit:

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d’extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d’anneau de court circuit) Le circuit électrique (Fig. III.27) .les sources de courant d’alimentation (I_1, I_2, I_3), Conducteurs de bobine toronnés (C_1, C_2, C_3), les Inductances de fuite, (L_1, L_2, L_3), les Résistances de chute de tension dans les réseaux (R_1, R_2, R_3, R4, R5, R6? (SC_1 ,SC_2) c'est un solid conductor.

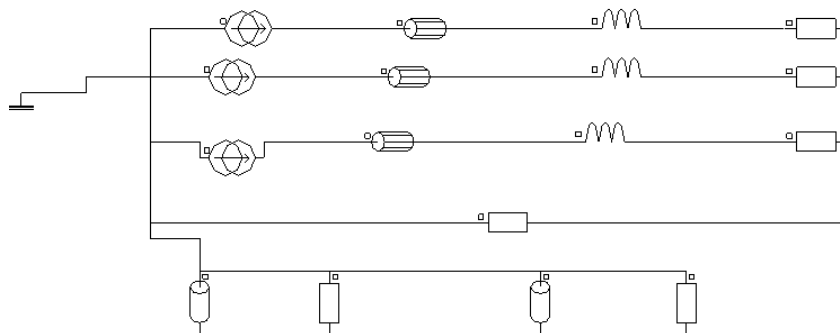


Figure III.27: Circuit intégré au projet.

III.8.3.4. Création de maillage:

Pour la première étape, le maillage d'éléments finis est généré sur le quart de la section transversale du moteur, comme on peut le voir sur la figure (III.28), Il se compose de plus de 7575 nœuds et de 3752 éléments surfaciques, qui permettent une plus grande précision des résultats on attend à un degré élevé de 91.79% d'éléments de excellent qualité et 6.96% d'éléments de bonne qualité on total a bonne qualité élément 98.75%des aiment L'influence de la densité du maillage sur la précision des résultats de calcul est toujours un sujet de discussion. Il est connu que l'augmentation du nombre d'éléments finis contribue à une augmentation de la précision des résultats.

Élément du maillage	Nombre
Nœuds	7575
D'éléments linéiques	1035
Eléments surfaciques	3752
Nombre d'éléments d'excellente qualité	91.79%
Nombre d'éléments de bonne qualité	6.96%
Nombre d'éléments de qualité moyenne	1.15%
Nombre d'éléments de qualité fable	0.11%

Tableau III.7: Qualité de maillage.

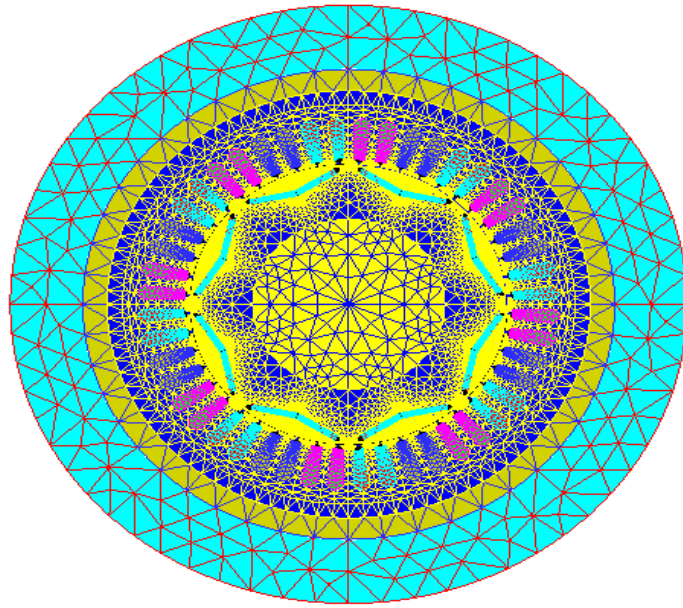
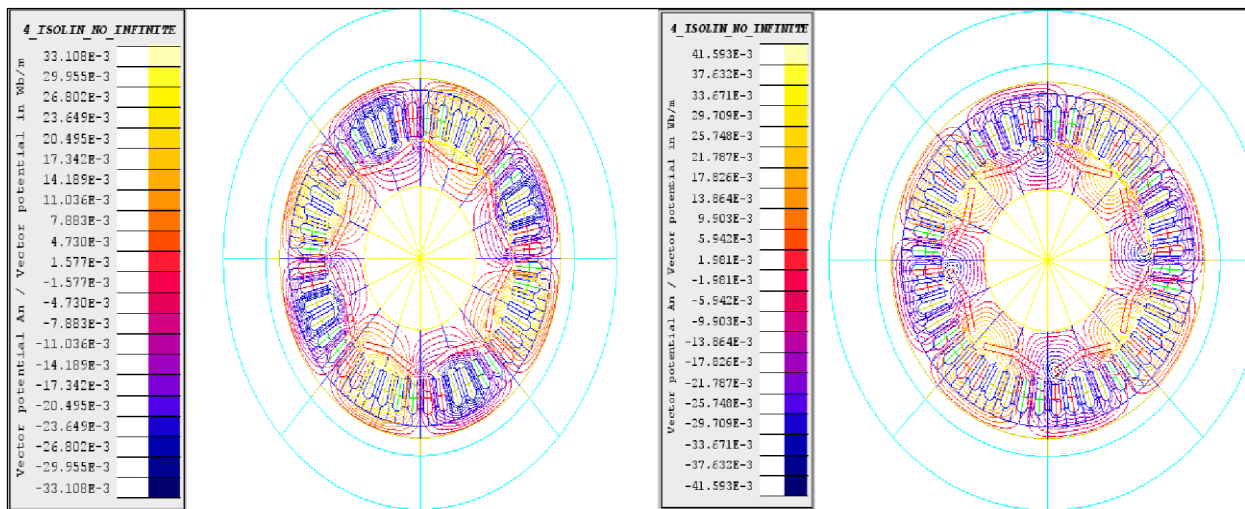


Figure III.28 : Représentation de maillage.

III.8.3.5. Résultats graphiques:

Les résultats de simulation ci-dessous représentent respectivement: la répartition des champs magnétiques, densité de flux magnétique, vecteur potentiel AN / vecteur potentiel IN, la densité de l'énergie et la perméabilité dans les deux prototypes étudiés.

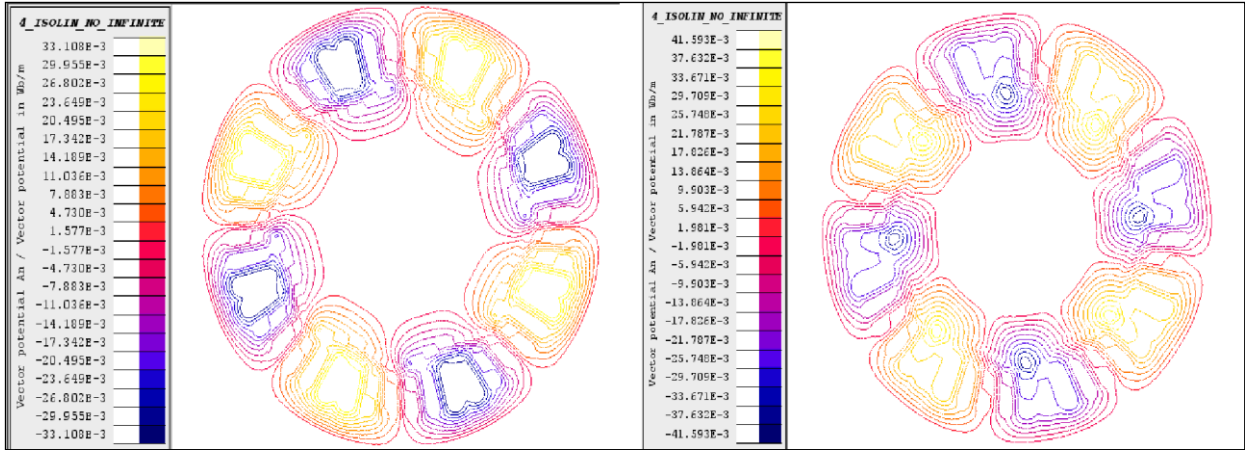


(a)

(b)

Figure III.29: Vecteur potentiel AN / Vecteur potentiel IN : (a) Machine conventionnelle.

(b) Machine supraconductrice.

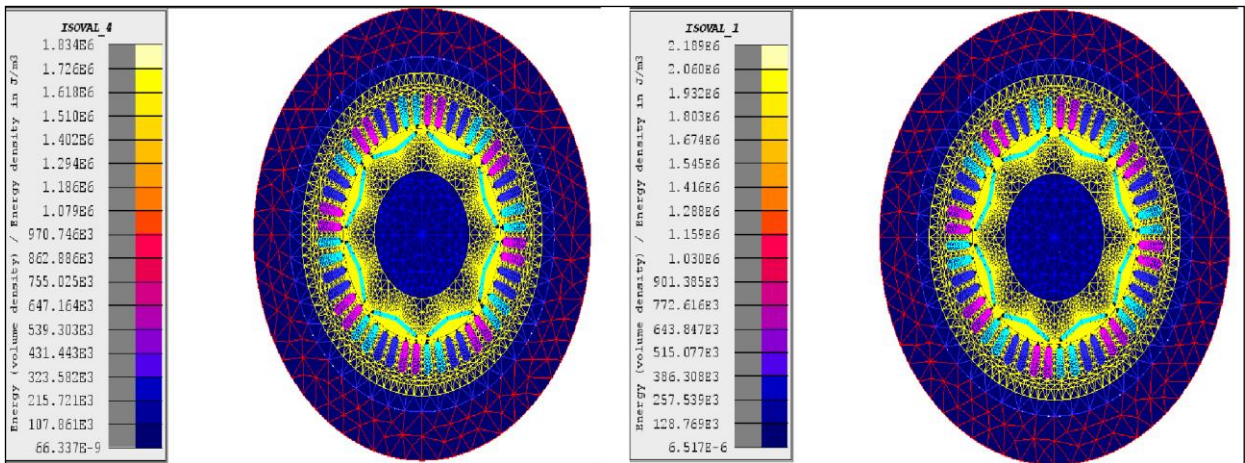


(a)

(b)

Figure III.30: Vecteur potentiel AN / Vecteur potentiel IN : (a) Machine conventionnelle.

(b) Machine supraconductrice.



(a)

(b)

Figure III.31: Densité d'énergie magnétique dans la machine : (a) Machine conventionnelle.

(b) Machine supraconductrice.

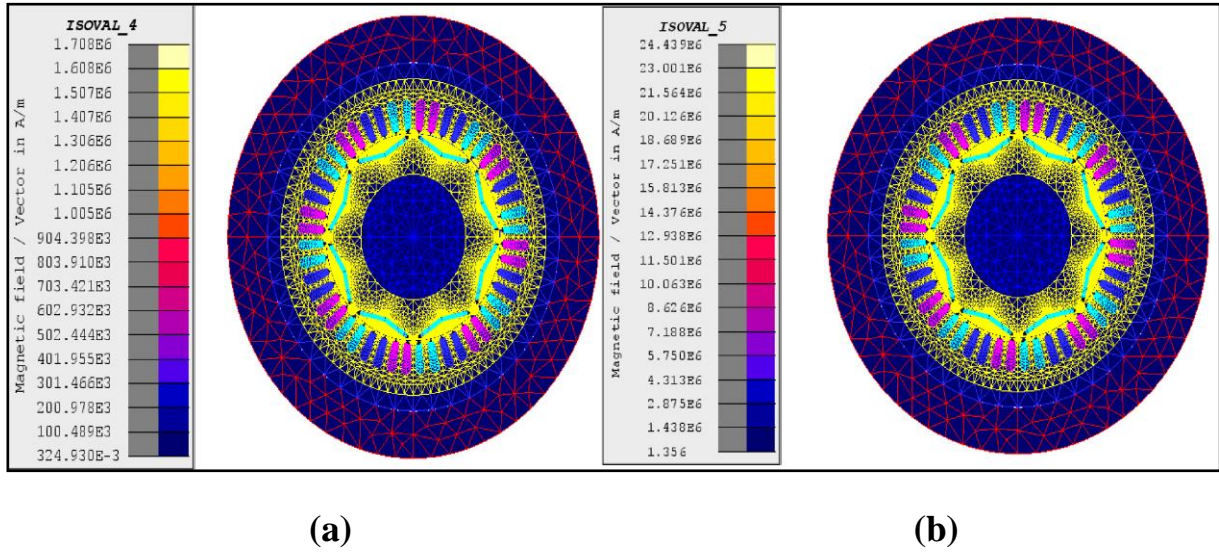


Figure III.32: Densité de champ magnétique: (a) Machine conventionnelle.

(b) Machine supraconductrice.

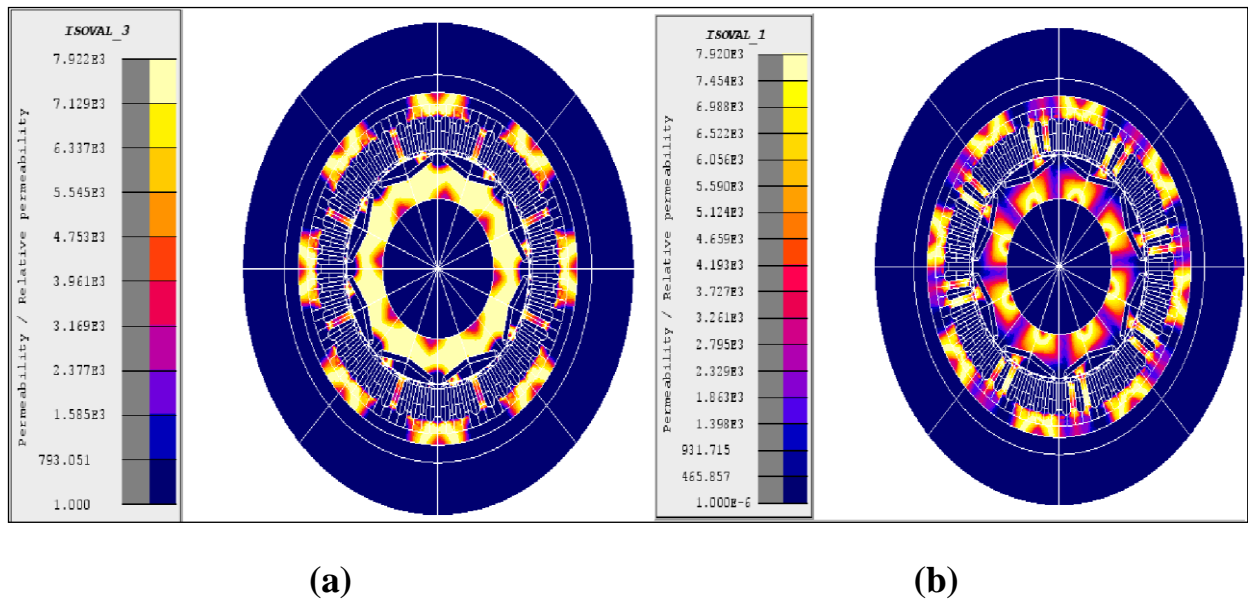


Figure III.33: Perméabilité dans la machine : (a) Machine conventionnelle.

(b) Machine supraconductrice.

III.8.3.6. Les courbes :

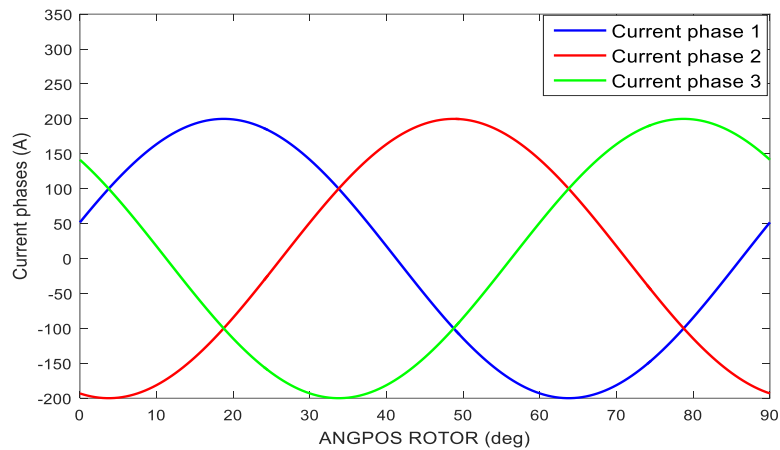


Figure III.34: Variation de courant en fonction de l'angle.

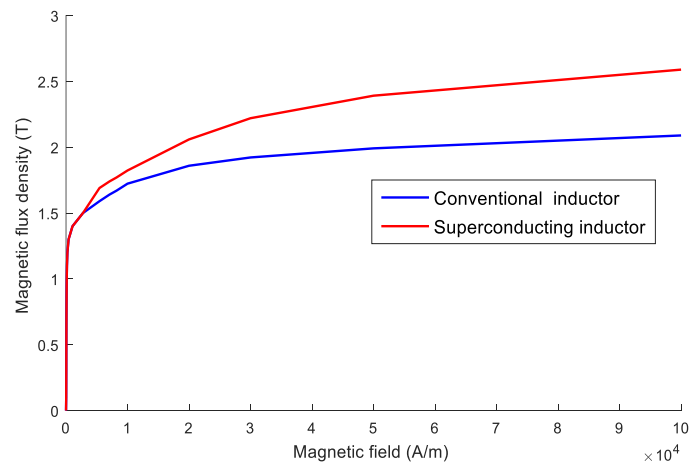


Figure III.35: Caractéristique $B=f(H)$ de NDFEB et supraconducteur HTC.

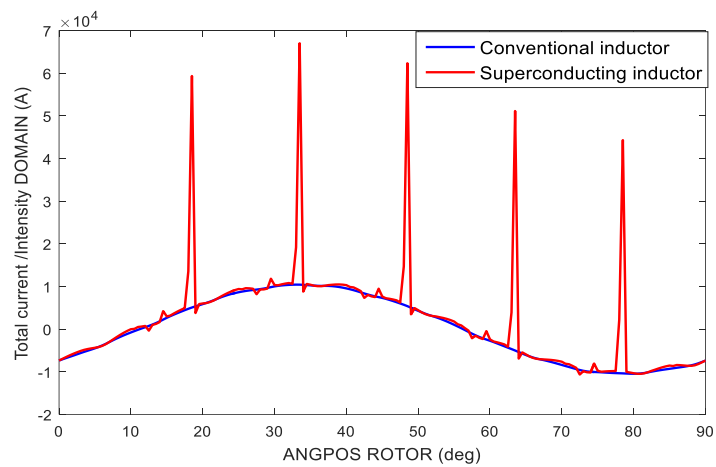


Figure III.36 : Variation de l'intensité de courant en fonction de l'angle.

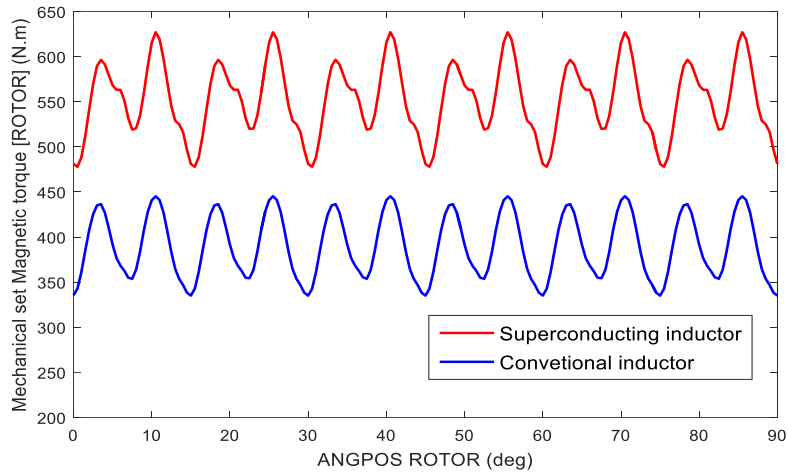


Figure III.37: Variation du couple électromagnétique en fonction de l'angle.

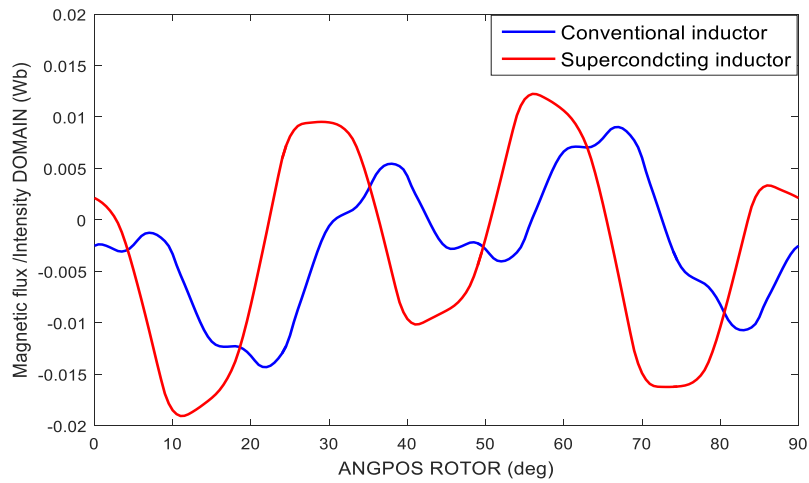


Figure III.38 : Variation de flux magnétique en fonction de l'angle.

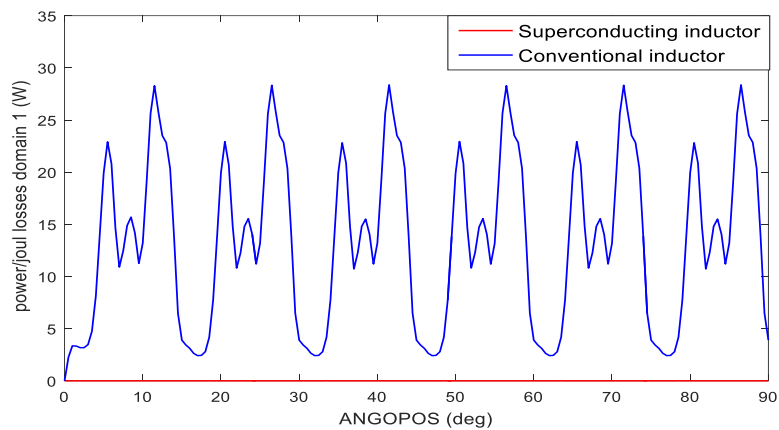


Figure III.39: Variation de perte joule en fonction de l'angle.

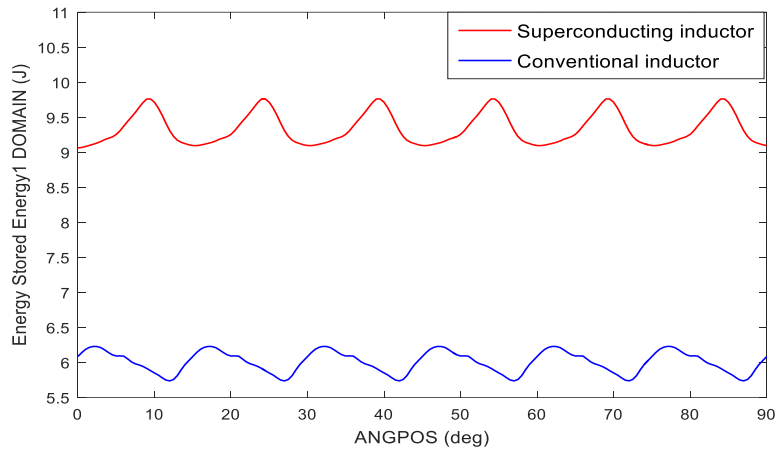


Figure III.40: Variation de l'énergie stockée en fonction de l'angle.

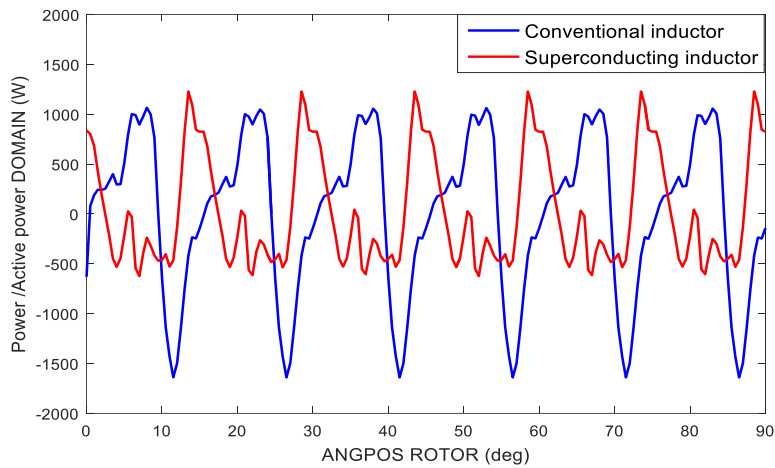


Figure III.41: Variation de puissance active de la machine en fonction de l'angle.

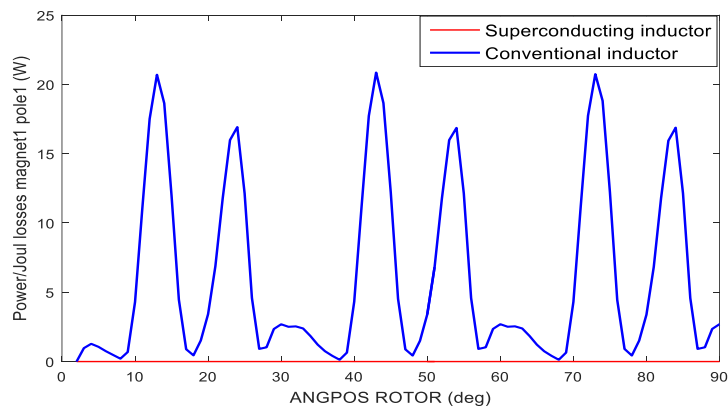


Figure III.42: Variation de perte joule de l'aimant en fonction de l'angle.

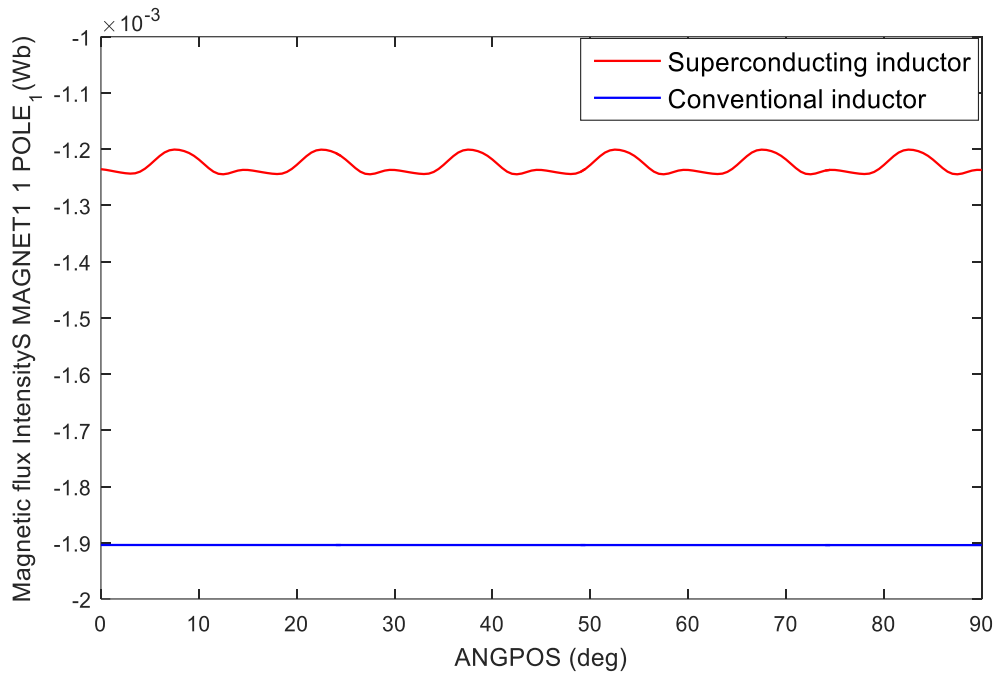


Figure III.43: Variation de l'intensité du flux de l'aimant en fonction de l'angle.

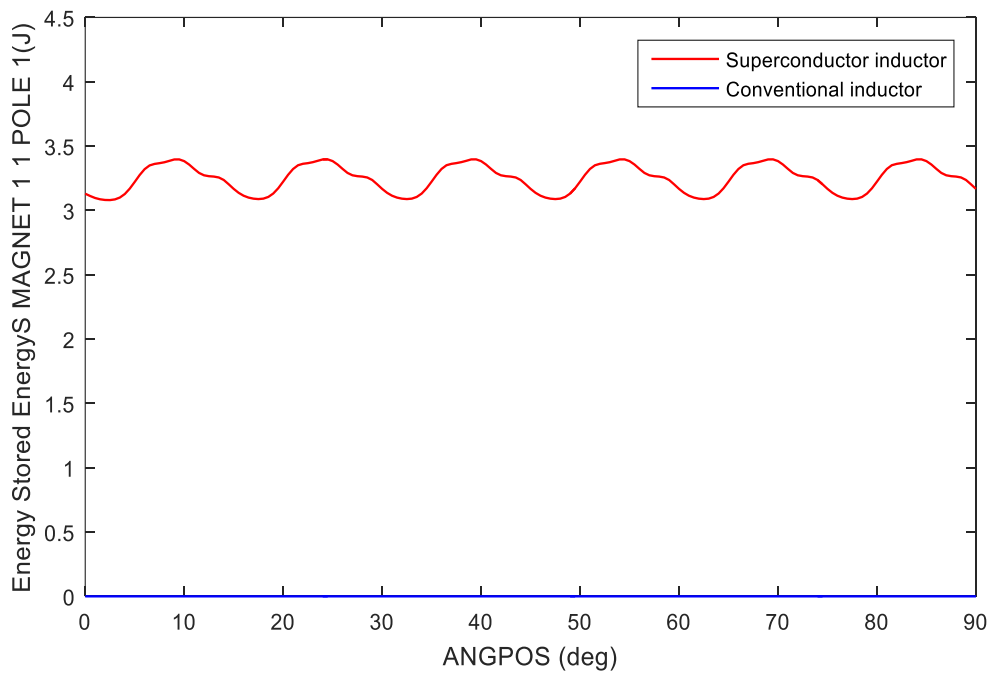


Figure III.44: Variation de l'énergie stockée de l'aimant en fonction de l'angle.

III.8.3.7. Interprétations des résultats:

Les résultats des simulations ont montré que l'approche proposée à améliorer considérablement les performances électromagnétiques et thermiques de la machines, telles que:

- Augmentation significative du champ magnétique par rapport aux moteurs conventionnels car le fil HTS transporter des courants beaucoup plus importants que le fil de cuivre et ces enroulements sont capables de générer des champs magnétiques beaucoup plus forts dans le moteur et cette augmentation du champ magnétique dans l'entrefer de la machine permet de réduire sa volume et sa masse.
- On note l'absence totale de pertes joules au niveau de l'aimant et au niveau de la machine lorsqu'un courant électrique le traverse par rapport au moteur synchrone à aimant permanent. On voit donc rapidement un avantage lié à son intégration dans les machines. La raison est due aux propriétés des matériaux supraconducteurs HTC dans lesquels il y a un manque de résistance électrique, ce qui permet une excellente utilisation de l'énergie et le rendement s'est amélioré.
- On remarque que la puissance active est proche dans chacune des deux machines, mais elle est plus stable dans la machine synchrone à aimant supraconducteur avec une très grande réduction du bruit et cela permet d'obtenir les mêmes performances de manière plus efficace et stable.
- L'énergie stockée dans le moteur synchrone supraconducteur augmente par rapport au moteur conventionnel. La raison réside dans la propriété de lévitation des matériaux supraconducteurs. L'énergie peut être stockée par un courant électrique dans une bobine de fil supraconducteur, elle conserve l'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation, avec peu de perte, puisqu'il n'y a quasiment aucun frottement.
- Augmentation de l'intensité du courant et l'intensité du flux magnétique d'un pourcentage significative dans le moteur supraconducteur au niveau de la machine et de l'aimant, et le couple magnétique est 50 % supérieur à celui d'une machine conventionnelle en raison de la densité de courant plus élevée, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de la machine.

III.9. Conclusion

L'utilisation des supraconducteurs à hautes températures critiques dans les machines synchrones apporte des gains de performances potentiels significatifs par rapport aux machines conventionnelles. Après avoir présenté les résultats obtenus pour les deux catégories des machines proposées, on note une amélioration des performances de la machine, de sa vitesse et des faibles pertes. Aussi on constate qu'au niveau de l'aimant supraconducteur l'intensité du flux magnétique augmente car les matériaux HTS ont une propriété qui permet une augmentation significative de l'entrefer du champ magnétique et de la charge de courant, ce qui induit un couple et une puissance plus élevés dans la machine.

Par contre, la puissance active est proche dans chacune des machines, mais elle est plus stable dans la machine à aimant supraconducteur, et l'énergie stockée y est plus grande. La raison tient aux propriétés des matériaux supraconducteur et aussi le couple électromagnétique est 50 pour cent plus grand que la machine conventionnelle en raison de la densité de courant plus élevée.

Donc d'après les résultats obtenus, nous concluons que les machines synchrones à aimant supraconducteur sont meilleures que la machine conventionnelle en termes de performances, d'efficacité, de stabilité, vitesse, et le rendement car les pertes par effet de Joules sont quasi nulles du fait de la température et de la disparition de la résistance, ce qui entraîne une augmentation de la puissance, donc cette machine fonctionne relativement de manière parfaite.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Ce travail est une contribution à l'étude et la modélisation bidimensionnelle des machines électrique intégrant des matériaux supraconducteurs à hautes températures critiques. On s'est intéressé à une structure de moteur synchrone à aimant supraconducteur. Pour cela nous avons analysé indépendamment les différents résultats obtenus à l'aide des logiciels proposés.

D'après les résultats de simulation obtenus, on peut affirmer que les supraconducteurs peuvent être largement appliqués dans les machines tournantes en raison des nombreux avantages qu'ils procurent, améliorant les performances de la machine, son rendement élevé, sa haute densité d'énergie et sa capacité à améliorer le facteur de puissance du système. Comme nous l'avons étudié et analysé dans cette modélisation de la machine synchrone à aimant supraconducteur en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). Y compris à la fois les propriétés électromagnétiques du supraconducteur et du moteur, à développer. Les méthodes de calcul et de diminution des pertes d'une machine entièrement supraconductrice sont étudiées, ce qui permet de simplifier la conception de la machine HTS et d'améliorer l'efficacité de la machine. Donc, afin de présenter la démarche de notre étude, on a procédé comme suit :

- Nous avons fait une étude détaillée sur les propriétés des matériaux supraconducteurs, où nous concluons dès le premier chapitre qu'ils sont largement utilisés dans le domaine industriel en raison des additifs efficaces qu'ils apportent aux machines, en particulier les matériaux supraconducteurs HTC. en raison de leur potentiel de températures élevées et parce qu'ils sont basés sur la transmission du courant parfaitement et le stockage d'énergie d'une manière plus grande.
- A travers le deuxième chapitre, nous achevons que la modélisation des matériaux et leur étude mathématique est une étape nécessaire et importante avant qu'ils ne soient représentés par des programmes de simulation.

Les résultats acquis à partir de cette étude après la simulation d'un moteur synchrone avec un aimant supraconducteur ont montré les caractéristiques distinctives et efficaces de performance par rapport à la machine traditionnelle, où le problème de bruit a été réduit. Et la grande énergie consommée dans la machine traditionnelle, où la disparition des pertes et une augmentation du champ magnétique ont été observées, ce qui signifie la possibilité d'obtenir

les mêmes performances que la machine traditionnelle, mais avec une taille et un poids plus légers. les matériaux HTS permettent une augmentation significative du champ d'entrefer et du courant de charge, ce qui se traduit par un couple et une puissance de sortie plus élevés, en raison de la densité de courant élevée des matériaux supraconducteurs HTC. Cependant, les pertes de courant alternatif dans les enroulements de stator peuvent être un problème majeur dans les machines à aimants supraconductrices, augmentant la charge de refroidissement et réduisant ainsi l'efficacité du traitement. Comme solution au problème, l'utilisation de transformateurs de flux externes contribue à réduire les pertes de courant.

Une poursuite possible de ce travail consisterait à :

- Etude de l'intégration des transformateurs de flux externes.
- Modélisation des machines dites totalement supraconductrices.
- Exploitation d'autres logiciels de simulation tels qu'ANSYS, COMSOL Multiphasique.
- Application des supraconducteurs dans d'autres types de machines, telles que les machines asynchrones.

Références bibliographiques:

- [1] **Lévêque, J., Berger, K., Lubin, T., & Douine, B.** (2018). Moteurs et générateurs supraconducteurs. La Revue 3 E. I, 94, 34-35.
- [2] **Belkhiri, S.** (2004). Contribution à l'étude des frontières libres de conduction et des pertes dans les fils supraconducteurs de type II massifs avec la loi de conduction idéale de BEAN (Mémoire de magistère, Batna, Université El Hadj Lakhder. Faculté des sciences de l'ingénieur).
- [3] **Belkhiri, S., Alloui, L., & Mebarek, F. B.** (2019). The Influence of the Geometrical Properties of Bulk Superconductors on Limiting Fault Current in an Electrical Network. Advanced Electromagnetics, 8(4), 136-142.
- [4] **Belkhiri, S., Bouroubi, M., & Harrabi, A.** (2020). Improvement of the Transient Stability of a 14-bus Network Using a Superconducting Fault-Current Limiter SFCL. Advanced Electromagnetics, 9(2), 75-83.
- [5] **MANGIN, Philippe; KAHN, Rémi.** Matériaux supraconducteurs. EDP Sciences, 2017.
- [6] **Wang, Z. S.** «The superconducting properties research of iron based-122 by transport and scanning micro-squid measurements», thèse de doctorat, Université de Grenoble ; Académie des sciences de l'Université de Chine, 2012.
- [7] **Bouchehou, Hocine.** «Étude d'une machine synchrone à base d'éléments supraconducteurs», Thèse de doctorat , Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel, 2019.
- [8] **Leclerc, Julien.** « Méthodes et outils de caractérisation électrique et magnétique des supraconducteurs », thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2013.
- [9] **Tnourji, Abdellah.** « Les caractéristiques des matériaux supraconducteurs» Article , February 2019.
- [10] **Elbaa, Mohamed.** «Caractérisation et modélisation des matériaux supraconducteurs à haute température critique», thèse de doctorat, Université de Lorraine; Université de Laghouat (Algérie), 2020.
- [11] **ABDERREZAKK, Amira.** «Etude des propriétés structurales, électriques et magnétiques de céramiques supraconductrices YBaCuO et BiSrCaCuO», thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 28/09/2005.

- [12] **BOUMARAF, Rabia.** «Modélisation par la méthode des volumes finis modifiés 3D d'une machine électrique supraconductrice », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra, 2021.
- [13] **Rada, Alhasan.** « Étude et Réalisation d'une Nouvelle Structure d'un Moteur synchrone supraconducteur ». Thèse doctorat de l'université de Lorraine, 2015.
- [14] **Mechekkef, Zakaria, Ayoub Ayadi.** « Etude de comportement d'un matériau supraconducteur » Mémoire de Mastère, Université de Jijel, 2020.
- [15] **Source :** <http://www.neel.cnrs.fr>.
- [16] **Renaud Moulin.** « Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs» Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2010.
- [17] **Stavrev, Svetlomisir.** « Modelling of high temperature superconductors for AC power applications » Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2002.
- [18] **KHALED, BEN ALIA.** « ETUDE DES SYSTEMES DE GUIDAGE MAGNETIQUE A BASE DE SUPRACONDUCTEUR HTc » , thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 2013.
- [19] **Yannick COINTE** « Limiteur Supraconducteur de Courant Continu » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 13 décembre 2007.
- [20] **JOSEPH BAIXIRAS** « Les Supraconducteurs Applications à l'électronique et à l'électrotechnique » CNRS EDITIONS France 1998.
- [21] **KEBBAB Nouredine** « Les Supraconducteurs, Modèles et Applications » Mémoire de Magister, Université de Batna, 05/04/2007.
- [22] **NEMDILI SAAD** « Modélisation et Simulation du Limiteur de Courant Supraconducteur » Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif-1, 04/12/2013
- [23] **Mr. DAHMANI Hemza et Mr. DOUMIR Souheyb** « Modalisation Des Matériaux Supraconducteurs Application à la Limitation de Courant de Défaut dans un Réseau Electrique à Neuf (9) Jeux de Barres » Mémoire de Mastère, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2018.

[24] **Iszabela, KLUTSCH.** « Modélisation des supraconducteurs et mesures » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 26 Septembre 2003.

[25] **MARAF Halla, NECIB Zaineb.** « Analyse de L'énergie Dissipative Dans Les Limiteurs de Courant Inductif Pour Les Systèmes D'énergie » Mémoire de Mastère, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 26/06/2018.

[26] **Rouahna, Farhat.** « Calcul Analytique des Pertes dans les Matériaux Supraconducteurs à Haute Température Critique (SHTc) » Mémoire de Mastère, Université de Biskra, 2012.

[27] **M.L.KHENE** « Modélisation des phénomènes électromagnétique dans les structures a géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis » thèse de Magister, Université de Batna, Juin 2006.

[28] **MECHRI, Rachid.** «Modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent par le logiciel COMSOL-Multiphysics » Mémoire de Mastère, Université de Mohamed Khider Biskra, 06/07/2019.

[29] **BENHADDA, Yamina.** «MACHINES ÉLECTRIQUES APPROFONDIES». Polycopié Cours UEF 112, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2020.

[30] **DEBOUB, Ilyas.** «Étude Et Dimensionnement D'une Machine Supraconductrice» , Université Mohamed Khider Biskra , 01 Juin 2017

[31] **Mansour, BARDADI BENDAHA.** «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel», thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2015.

[32] **Source :**<http://www.Leblogauto.com>

[33] **BEKKA, Nassim.** «Modélisation et optimisation d'actionneurs rotatifs fort couple pour systèmes embarqués» , thèse de doctorat, Université de Nantes,2015.

[34] **NICOLAS, WIEST-MILLION; JULIEN, Lemoine; EDOUARD, S. O. L. T.** « Les matériaux supraconducteurs». Rapport d'Epistémologie, 2002.

[35] **DOLISY, Bastien.** « Étude d'un moteur supraconducteur à flux axial avec une transmission magnétique supraconductrice intégrée », thèse de doctorat, Université de Lorraine,2015.

[36] <https://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/aimant-supraconducteur-229221.html>

[37] **Gony, B., Berger, K., Douine, B., & Lévêque, J.** (2015, May). Etude de la désaimantation d'une pastille supraconductrice YBCO dans un circuit magnétique. In 11èmes Journées de Cryogénie et de Supraconductivité (pp. page-47).

[38] **Miki, M., et al.** « Development of a synchronous motor with Gd–Ba–Cu–O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system » *Superconductor Science and Technology* 19.7 (2006): S494.

[39] **BELGUERRAS, Lamia.** « Études théoriques et expérimentales d'accouplements magnétiques supraconducteurs », thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2014.

[40] **Alexandre, Colle.** « Étude d'une machine supraconductrice à flux axial pour une application aéronautique », thèse de doctorat, Université de Lorraine, 3 Sep 2020 .

[41] **Douine, B., Berger, K., Lévêque, J., Menana, H., Hinaje, M., Elbaa, M., & AILAM, E.** (2018, July). « Ecrans et aimants supraconducteurs: performances et applications. In Symposium de Génie Electrique (SGE 2018) » (pp. p-36).

[42] **Noureddine BOUNASLA** , « Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents » , Université Ferhat ABBAS Sétif, 2014.

ملخص

يشكل اكتشاف المواد فائقة التوصيل HTC YBCO و BSCCO خطوة نوعية في المجالات الصناعية بسبب الخصائص التي تميزها وقدرتها على إنتاج مجالات مغناطيسية مكثفة، مما جعل من الممكن تطبيقها على الآلات الدوارة مثل آلة المغناطيس المتزامن فائقة التوصيل بسبب أداؤها الفعال وتقليل الضوضاء والخسائر. يقوم على زيادة التيار الكهربائي في الجزء المتحرك مما يزيد بشكل كبير من كثافة الطاقة مما يعني إمكانية تقليص حجم الماكينة مع الحصول على أداء أفضل وبالتالي استخدامها بطريقة جديدة ومبتكرة. بالإضافة إلى ذلك ، تؤدي زيادة كفاءة المحرك إلى انخفاض تكاليف التشغيل مقارنة بالمحركات التقليدية. في هذا العمل ، نقدم دراسة مقارنة بين الآلات المتزامنة ذات المغناطيسات فائقة التوصيل وتلك التي يتم إجراؤها بواسطة برنامجين مختلفين ؛ FLUX2D على أساس طريقة العناصر المحدودة و SIMULINK تحت MATLAB..

Résumé

La découverte des matériaux supraconducteurs HTC YBCO et BSCCO a constitué un pas qualitatif dans les domaines industriels en raison des caractéristiques qui les distinguent et de leurs capacités à produire des champs magnétiques intenses, ce qui a permis de les appliquer à des machines tournantes telles que la machine synchrone à aimants supraconducteurs, en raison de leurs performances efficaces de réduire le bruit et les pertes. Il est basé sur l'augmentation du courant électrique dans la partie mobile, ce qui augmente considérablement la densité d'énergie, ce qui signifie la possibilité de réduire la taille de la machine tout en obtenant de meilleures performances, donc en l'utilisant de manière nouvelle et innovante. De plus, l'augmentation du rendement du moteur entraîne des coûts d'exploitation inférieurs à ceux des moteurs conventionnels. Dans ce travail, nous présentons une étude comparative entre les machines synchrones traditionnelle et celles à aimants supraconducteurs sous deux différents logiciels; FLUX2D basé sur la méthode des éléments finis et SIMULINK sous MATLAB.

Abstract

The discovery of superconducting materials HTC YBCO and BSCCO constituted a qualitative step in the industrial fields because of the characteristics which distinguish them and their capacities to produce intense magnetic fields, which made it possible to apply them to rotating machines such as the synchronous machine with superconducting magnets, due to their efficient performance of reducing noise and losses. It is based on increasing the electric current in the moving part, which greatly increases the energy density, which means the possibility of reducing the size of the machine while obtaining better performance, therefore using it from new and innovative way. In addition, the increased engine efficiency results in lower operating costs than conventional engines. In this work, we present a comparative study between traditional synchronous machines and those with superconducting magnets under two different software; FLUX2D based on the finite element method and SIMULINK under MATLAB.