

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



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

Réf:.....

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

MASTER

Thème

*Modélisation des machines supraconductrice par le
logiciel Flux-2D*

Présenté par :
GHAMRI Okba
Soutenu le : 04 Juin 2015

Devant le jury composé de :

Mr. *ALLOUI Lotfi*

Mr. *KHENE Mohamed Lotfi*

Mr. *REZIG Mohamed*

M.C.A

M.C.B

M.A.A

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2014 / 2015

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



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

Réf:.....

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

MASTER

Thème

*Modélisation des machines supraconductrice par le
logiciel Flux-2D*

Présenté par :

GHAMRI Okba

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. KHENE Mohamed Lotfi

signature

Avis favorable du Président du Jury

Dr. ALLOUI Lotfi

Signature

Cachet et signature

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



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

Thème :

*Modélisation des machines supraconductrice par le
logiciel Flux-2D*

Proposé par : **GHAMRI Okba**

Dirigé par : **Dr. KHENE Mohamed Lotfi**

RESUME

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de l'insertion des aimants supraconducteurs dans les machines à aimant à pôles lisses et à pôles saillants. Cette étude est basée sur une comparaison entre l'induction magnétique et le couple électromagnétique obtenus par les aimants permanents conventionnels et les aimants supraconducteurs.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة تأثير المغناطيس فانق الناقلية على الماكنات الكهربائية التي تعمل بالمغانط و القيام بمقارنة التحريض المغناطيسي و للعزم الكهرمغناطيسي بين المغناط الدائمة العادية و المغناطيس فانق الناقلية و لهذا فقد قمنا بمحاكات ماكنتين تعمل بالمغانط الأولى بأقطاب بارزة و الثانية بأقطاب ملساء.

Remerciement

Je tiens en premier lieu à remercier *Allah* omnipotent omniprésent et omniscient, qui m'a donné la santé, le courage et la volonté pour arriver à bous de ce travail.

Je tiens à remercier *Dr. Khene Mohamed Lotfi* qui a accepté de m'encadrer, pour avoir brillamment dirigé cette étude et m'avoir fait partager son savoir faire et sa rigueur scientifique, ainsi que ses multiples compétences. Qu'il soit assuré de toute ma gratitude et de ma reconnaissance.

Je voudrais également remercier très sincèrement *Dr. Alloui Lotfi* pour son soutien permanent et pour l'aide et les conseils. Ainsi qu'il ma fait l'honneur de présider le jury.

Mes vifs remerciements vont également à *Mr. Rezig Mohamed* pour avoir accepté de faire partie de ce jury.

Mes vifs remerciements vont également à *Pr.Mimoune Souri Mohamed* pour son soutien et ses conseils.

Je tiens à remercier tous mes professeurs du département d'électrotechnique.

Je ne peux manquer de remercier Mes amis et collègues au laboratoire *Mohamed* et *Haider* pour leur aide à réalisation ce travail. Leur gentillesse, leurs grandes qualités humaines, et pour les beaux souvenirs.

Pour finir, j'adresse mes remerciements à ma famille et tous mes amis et ma profonde reconnaissance à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé pour finaliser ce travail.



Dédicace

*Je remercie tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné le courage
et la patience pour accomplir ce travail.*

Je dédie ce modeste mémoire :

*A ma très chère mère et mon très Cher et regrette père «Abd al-aziz » qui
m'ont toujours soutenu.*

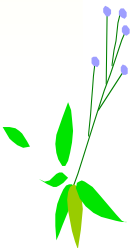
A mon frères «Ahmed» et «Abd al-hakhe»

A mes sœurs

A toute la famille

A mes neveux «Yahia et yasine» ET à ma nièce «yasmine»

A tous mes amis



Liste des figures

Figure I.1 : Résistance en Ohm d'un échantillon de mercure. [1].....	03
Figure I. 2 : Effet Meissner dans une sphère supraconductrice. [1].....	04
Figure I.3 : la découverte des matériaux supraconducteurs au fil des années. [2].....	05
Figure I.4 : Surface critique des différents matériaux supraconducteurs [3].....	05
Figure I.5 : Courbes d'aimantation en fonction du champ appliqué d'un Supraconducteur de type I [1].....	07
Figure I.6 : longueur de London [2].....	08
Figure I.7 : Courbe B(H) pour un supraconducteur de type II. [2].....	10
Figure I.8 : Constitution d'un vortex. [2].....	11
Figure I.9 : Caractéristique champ électrique densité de courant à T=0K. [2].....	12
Figure I.10 : IRM (Imagerie Résonance Magnétique). [3].....	13
Figure I.11 : Aimant de détection ATLAS du LHC. [6].....	14
Figure I.12 : Principe d'un tokamak. [6].....	15
Figure I.13 : Maglev (Japon): septembre 2011. [6].....	16
Figure II.1 : l'enchaînement des programmes de Flux 2D. [14].....	25
Figure III.1 Photo réel d'un moteur C.C sans balais. [7].....	26
Figure III.2 Structure convertisseur-machine-capteur de position. [8].....	27
Figure III.3 Formes d'onde des machines [8].....	28
Figure III. 4 Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, principe. [5].....	29
Figure III. 5 Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, 15kW 750tr/min et 150kW 400tr/min. [5].....	29
Figure III. 6 Coupe du moteur synchrone supraconducteur à griffe de Central Japan Railway Compagny. [5].....	30
Figure III. 7 Vue éclatée de l'inducteur à griffe, Sumitomo. [5].....	30
Figure III. 8 Moteur supraconducteur griffe, 13.6kW-500tr/min, Central Japan Railway Compagny. [5].....	31
Figure III. 9 Moteur supraconducteur griffe, 18kW-4500tr/min, Sumitomo.[5].....	31
Figure III. 10 Voiture électrique supraconductrice. [5].....	32
Figure III. 11. Structure de l'inducteur. [5].....	32
Figure III. 12 Inducteur supraconducteur réalisé. [5].....	33
Figure III. 13 Moteur supraconducteur à concentration de flux, 20kW-750tr/min. [5].....	34
Figure IV.1 : Le modèle de la machine à aimant à pôles saillant. [15].....	36
Figure IV.2 (a-b) : Le un quart (1/4) de la géométrie et le maillage triangulaire de la machine	37

étudier.....	
Figure IV.3 : Le circuit de commande.....	37
Figure IV.4 : La répartition des lignes du flux magnétique dans la machine.....	38
Figure IV. 5 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$	39
Figure IV. 6 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$	40
Figure IV. 7(a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.2T$ et $1.4T$	41
Figure IV. 8(a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$	42
Figure IV. 9(a-b): La variation spatiale de l'induction magnétique obtenue pour un aimant permanent supraconducteur avec $B_r = 2T$	43
Figure IV. 10 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$	44
Figure IV. 11(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$	45
Figure IV. 12(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$	46
Figure IV. 13(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$	47
Figure IV. 14(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$	48
Figure IV.15 (a-b) : Le un quart ($1/4$) de la géométrie et le maillage triangulaire de la machine étudier	49
Figure IV.16 : La répartition des lignes du flux magnétique dans la machine.....	50
Figure IV.17 (a-b) : la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$	51
Figure IV.18 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$	52
Figure IV. 19 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$	53
Figure IV. 20 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant	54

supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$	
Figure IV. 21 : la variation spatiale de l'induction magnétique obtenue pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$	55
Figure IV. 22 (a-b) La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$	56
Figure IV. 23 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$	57
Figure IV. 24 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$	58
Figure IV. 25 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$	59
Figure IV. 26 : la variation temporelle du couple électromagnétique obtenu pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$	60
Figure IV.27 : La répartition des lignes du flux magnétique dans la machine étudié.....	62
Figure IV.28 : la variation spatiale de l'induction magnétique obtenue dans la machine étudiée.....	62

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Supraconducteurs à basse température(SBT).....	07
Tableau I.2 : Supraconducteurs à Haute température critique (SHT).....	10
Tableau I.3 : Matériaux supraconducteurs pour les applications en électrotechnique.....	12

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Dimensions de la machine.....	35
Tableau IV.2 : Les caractéristiques du matériau supraconducteur utilisé.....	61

Remerciement	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale	01
Chapitre I Généralité sur les matériaux supraconducteurs	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Différents types des supraconducteurs.....	05
I.2.1 Type I.....	06
I.2.1.1 Température Critique T_c	06
I.2.1.2 Champ critique.....	07
I.2.1.3 Densité de courant critique.....	08
I.2.2 Type II.....	08
I.2.2.1 Température Critique T_c	09
I.2.2.2 Champ critique.....	10
I.2.2.3 Densité de courant critique.....	11
I.3 Applications de la supraconductivité.....	12
I.3.1 Premier bilan.....	12
I.3.2 Les applications médicales.....	13
I.3.3 Les aimants pour la recherche.....	14
I.3.4 Les tokamaks	14
I.3.5 Le stockage de l'électricité.....	15
I.3.6 Les trains à lévitation magnétique.....	15
Chapitre II Model mathématique et numérique	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Equations de base et lois liées a la matière.....	17
II.3 Formulation des équations électromagnétiques.....	18
II.3.1 Le modèle électrocinétique.....	19
II.3.2 Le modèle magnétodynamique.....	19
II.3.3 Modèle magnétostatique.....	20
II.3.4 Modèle magnétodynamique.....	22
II.4 Diverses méthodes numériques de discrétisation.....	22

II.4.1 Méthode des différences finis (MDF).....	22
II.4.2 Méthode des intégrales de frontière (MIF).....	22
II.4.3 Méthode des circuits couplés (MCC).....	23
II.4.4 Méthode des volumes finis (MVF).....	23
II.4.5 Méthode des éléments finis (MEF).....	23
II.4.6 Le logiciel flux 2D.....	24
 Chapitre III Les moteurs à courant continue sans balais et les moteurs supraconducteurs	
III.1 Les moteurs à courant continue sans balais.....	26
III.1.1 Principe de fonctionnement.....	26
III.1.2 Logique de commande.....	27
III.2 Machines supraconducteurs.....	28
III.2.1 Moteur synchrone à aimants permanents.....	28
III.2.2 Moteur à griffe.....	30
III.2.3 Moteur à concentration de flux	32
 Chapitre IV Applications	
IV.1 Introduction.....	35
IV.2 Machine à aimant à pôles saillant.....	35
IV-2-1 Description du système.....	35
IV-2-2 Résultats de simulations.....	36
IV-2-3 Interprétations.....	48
IV-3 Machines à aimant à pôles lisses.....	49
IV-3-1 Description du système.....	49
IV-3-2 Résultats de simulations.....	49
IV-3-3 Interprétation.....	60
VI.4. Machine avec un matériau supraconducteur	61
IV-4-1 Description du système.....	61
IV-4-2 Justification.....	63
VI.5. Conclusion.....	63
Conclusion générale	64
Bibliographie	66

Introduction générale

Découverte en 1911, la supraconductivité est un nouvel état de la matière, cet état se distingue par une remarquable combinaison de propriétés électriques et magnétiques. Une absence complète de la résistivité au passage d'un courant électrique entraînant une circulation du courant sans pertes par effet Joule, est la principale caractéristique de la supraconductivité. Une autre propriété fondamentale est le diamagnétisme parfait ou "l'effet Meissner" un supraconducteur expulse les lignes de flux magnétiques appliquées hors de son volume.

L'intérêt technologique des supraconducteurs dans notre vie quotidienne est indéniable. En effet les systèmes actuels ont plusieurs limites : ils sont contraignants par leur poids, leur encombrement et leurs conducteurs chauffent. Nous voyons donc l'intérêt de l'utilisation de machines supraconductrices pour contourner ces obstacles. De plus, ils ont un avantage sur le plan économique et environnemental. On note toutefois que les supraconducteurs nécessitent encore une température très faible.

La plus part des machines supraconducteur sont des machines à aimants permanents qu'elles soient en mode moteur ou générateur. Les machines à aimants permanents sont devenues plus attractives car elles répondent bien aux exigences des nouvelles technologies. Le regain d'intérêt pour ces machines est dû en grande partie à leur excellente caractéristique dynamique et leurs faibles pertes, ainsi qu'à leur important couple massique que les rendent mieux adaptées aux applications industrielles à entraînements électriques nécessitant des commandes en position ou en vitesse.

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut étudier au sein des machines électriques (supraconductrice, asynchrone, synchroneetc) sont régis par les équations de Maxwell et les propriétés caractéristiques des matériaux qui composent les systèmes étudiés telles que la perméabilité magnétique, la conductivité électrique, ...etc. Ces phénomènes sont décrits par des équations aux dérivées partielles (EDP).

Le développement des méthodes numériques de discrétisation (différences finies, éléments finis, intégrales de frontière, volumes finis, etc.) est heureusement accompagné par les avancées du matériel informatique. Des programmes qui nécessitaient autrefois des calculateurs complexes et onéreux tournent à présent sur des PC d'un coût modeste. Cela a contribué à faciliter la mise

au point de logiciels performants dont on cite quelques exemples, comme Flux-2D, Flux3D, Flux Expert, Maxwell et Femlab ...etc, ainsi que l'émergence des logiciels dédiés et développés dans les laboratoires spécialisés. D'autres concepteurs proposent des logiciels utilisant une méthode particulière (souvent la méthode des éléments finis et comportant des modules permettant de traiter des problèmes physiques de nature différentes (mécanique, thermique, électromagnétique, mécanique des fluides etc.).

Dans ce travail, nous utilisons le logiciel Flux-2D qui est basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques au problème physique étudié, pour modéliser deux machines électriques. Il s'agit de la machine à aimant à pôles saillants et à pôles lisses, en vue de faire une comparaison entre l'insertion des aimants permanents conventionnelle et les aimants supraconducteurs dans ces machines. Cette comparaison mène à déduire les performances, les caractéristiques des machines supraconductrices.

Ainsi, notre travail sera organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les matériaux supraconducteurs, ainsi que leurs applications dans le domaine industriel.

Le deuxième chapitre sera consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques et aux diverses méthodes de discrétisation des équations aux dérivées partielles, ainsi que la définition de logiciel Flux-2D.

Dans un troisième chapitre, nous présentons les moteurs supraconducteurs et les moteurs à courant continu sans balais, leurs descriptions et commandes.

Pour déduire l'efficacité des aimants supraconducteurs, nous proposons dans un quatrième chapitre, les résultats de simulation par Flux-2D de la machine à aimant à pôles saillants et à pôles lisses.

Enfin, nous tirons une conclusion générale résumant notre travail et nous proposons quelques suggestions futures.



Chapitre I

I.1 Introduction

En 1911, pour la première fois, un tel conducteur a été mis à jour. Kammerling Onnes, ayant réussi à atteindre des températures, inférieures à 4 kelvins en liquéfiant de l'hélium, décida de tester différents conducteurs de l'électricité à très basse température. Aidé par G.Holtz, il s'aperçut que la résistance électrique de mercure devenait brutalement non mesurable lorsque la température devenait inférieure à 4 K, cette température à laquelle le matériau devient supraconducteur est appelée température critique la supraconductivité était découverte.

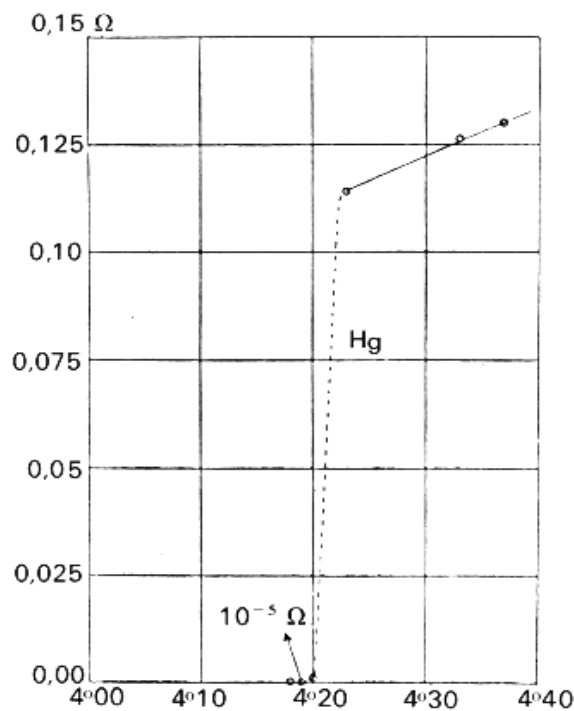


Figure I.1 : Résistance en Ohm d'un échantillon de mercure. [1]

En 1933, les expériences de Meissner et Ochsenfeld montrent que lorsqu'un composé devient supraconducteur, le flux magnétique est repoussé en dehors de l'échantillon, c'est-à-dire qu'il présente un diamagnétisme parfait pour des champs magnétiques suffisamment faibles. En dit un matériau est supraconducteur lorsqu'il conduit de l'électricité sans résistance électrique au-dessous d'une température, dite température critique (T_c). L'absence de résistivité ($Wm < 10^{-25}$) en courant continu, est le phénomène le plus intéressant pour ce qui concerne le transport de l'énergie électrique.

Un autre phénomène plus intéressant : le diamagnétisme parfait. Quand un échantillon Supraconducteur est refroidi en dessous de sa température critique puis placé dans un champ magnétique, on observe une transition du conducteur de son état normal figure(I.2.a) à l'état supraconducteur figure(I.2.b).en remarque que le matériau dans son état supraconducteur présente un effet diamagnétique presque parfait, appelé effet MEISSNER (le champ magnétique ne peut pas pénétrer à l'intérieur de ces matériaux). Un champ magnétique extérieur induit la circulation des courants dans le supraconducteur qui créent à leur tour un champ magnétique opposé. [1]

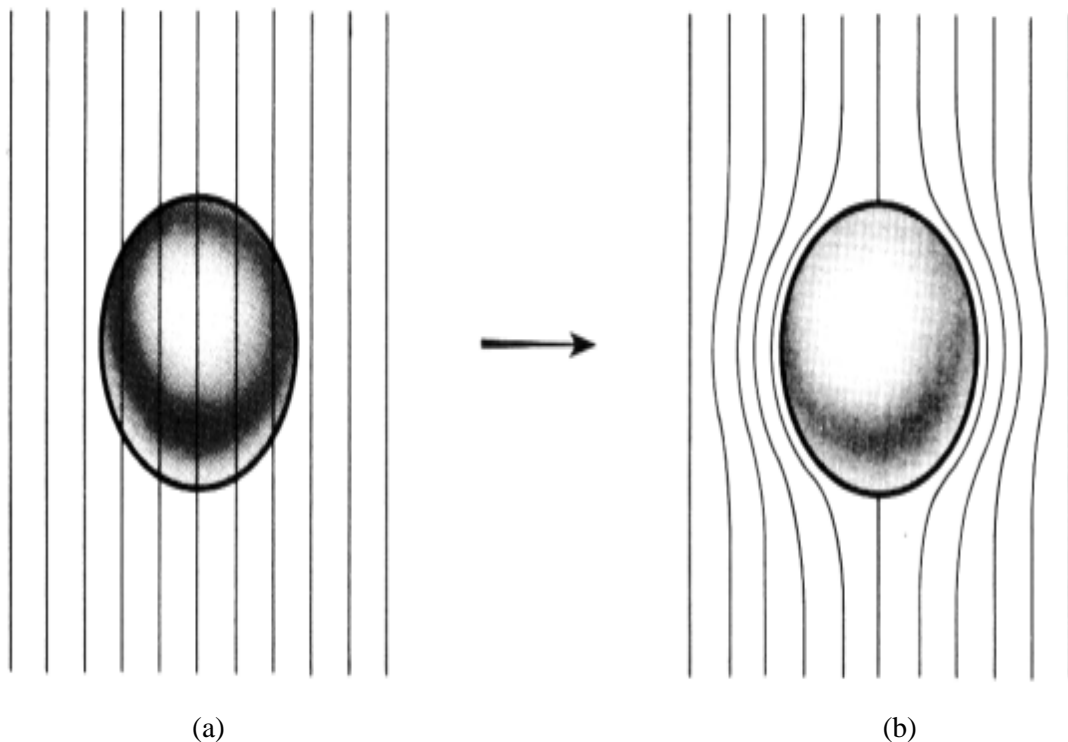


Figure I. 2 : Effet Meissner dans une sphère supraconductrice. [1]

Ils sont des matériaux étonnants. Leur capacité à conduire le courant sans dissipation d'énergie ainsi que leur diamagnétisme permet la confection de systèmes électrotechnique plus performants.

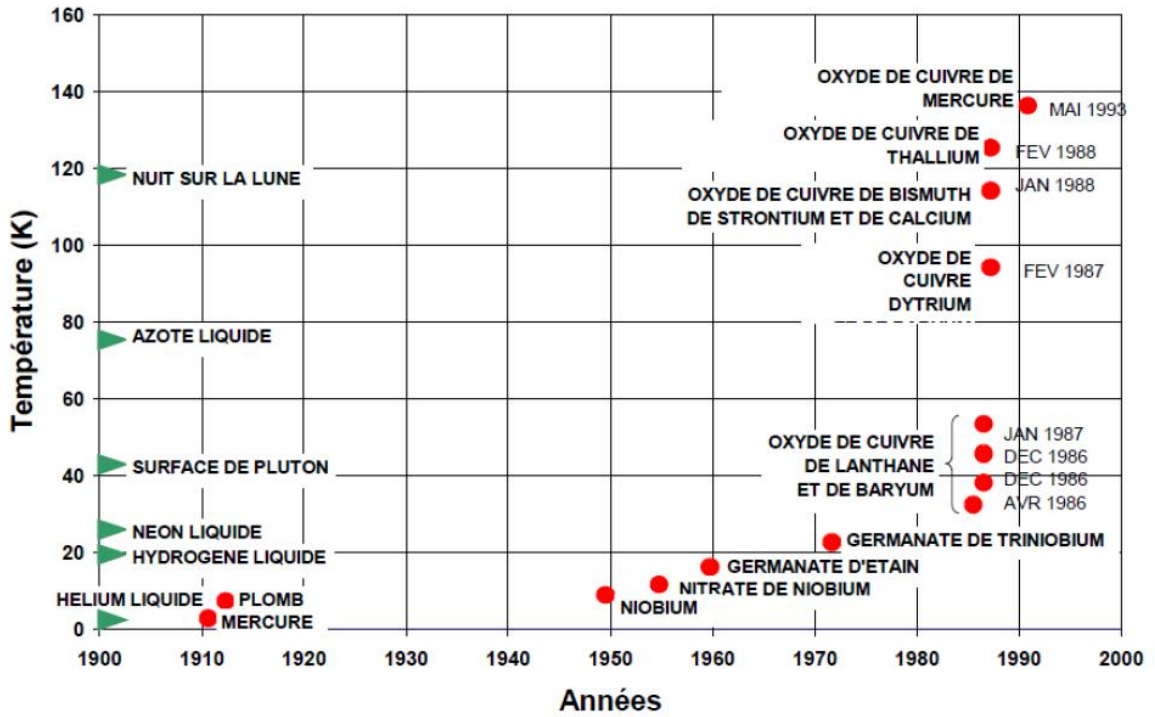


Figure I.3 : la découverte des matériaux supraconducteurs au fil des années. [2]

I.2 Différents types des supraconducteurs

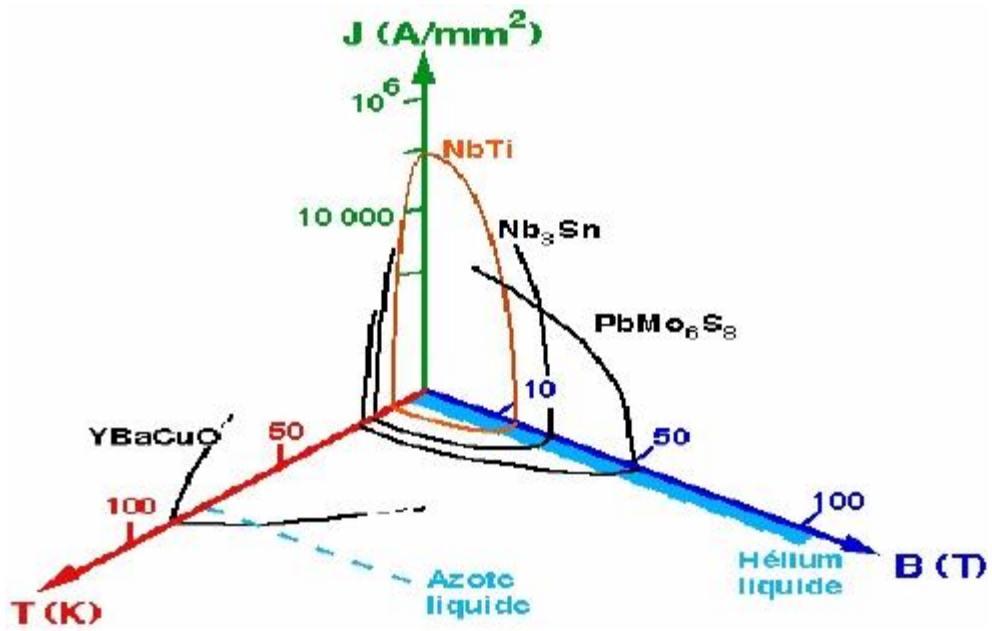


Figure I.4 : Surface critique des différents matériaux supraconducteurs [3]

I.2.1 Type I

La catégorie des supraconducteurs de type I est principalement constitué de métaux et de metalloïdes qui présentent une certaine conductivité à température ambiante. Ils requièrent une très basse température pour ralentir assez les vibrations moléculaires et faciliter ainsi le flux d'électrons sans frottement en accord avec la théorie BCS. La théorie BCS suggère que les électrons se couplent en "paires de Cooper" de façon à s'aider les uns les autres à passer les obstacles moléculaires (un peu comme dans une course de voitures sur circuit où les pilotes suivent de très près pour aller plus vite).

Les supraconducteurs de type I (nommées "soft supraconductors" en anglais) ont été découvert en premier et requièrent une très basse température pour obtenir de la supraconductivité. Ce type est caractérisé par une transition brutale vers un état de supraconductivité et un parfait diamagnétisme (capacité de repousser un champ magnétique).

Ci-dessous une liste de matériaux supraconducteurs de type I et la température de transition critique en dessous de laquelle le matériau est supraconducteur. [4]

D'autres éléments peuvent être mis en état de supraconduction par application de hautes pressions. Par exemple le supraconducteur de type I avec la température critique la plus élevée est le sulfure à 17K. Mais il a besoin d'une pression de 930 000 atmosphères pour être supraconducteur et de 1,6 million atmosphère pour atteindre sa température critique de 17K.

I.2.1.1 Température Critique T_c

Les supraconducteurs à basse température critique nécessitent des très basses. Généralement inférieures à 23K, le tableau 1.1 donne quelques exemples des matériaux supraconducteur basse température critique. Ainsi que leur température critique. Pour ce type de supraconducteurs, on utilise l'hélium liquide, caractérisé par une température de 4 K, comme milieu cryogénique, l'inconvénient majeur de ce type de matériau, est du au coût élevé de l'hélium. Ce type de matériau, est utilisé pour la réalisation des enroulements supraconducteur, très utilisé pour la réalisation des machines supraconductrices ou bien des transformateurs supraconducteurs. [1]

Tableau I.1 : Supraconducteurs à basse température(SBT).[1]

Supraconducteur	T_c (K)
Nb-Ti	9
Nb ₃ Sn	18.3
Nb ₃ Al	18.9
Nb ₃ Ga	20
Nb ₃ Ge	22

I.2.1.2 Champ critique

L'état supraconducteur peut être détruit par l'application d'un champ extérieur. La valeur du champ pour laquelle le matériau revient à l'état normal est appelée champ critique et notée H_c . La figure I.5 illustre le phénomène.

Les supraconducteurs de type I sont, en général, des corps simples tels que l'étain ou le plomb. Ce sont les premiers supraconducteurs à avoir été découverts. Ce type de matériau présente un diamagnétisme parfait tant que l'état supraconducteur subsiste.

Lorsque le champ magnétique extérieur est inférieur à H_c , le champ magnétique dans le volume du supraconducteur est nul, sauf dans une petite zone de circulation des courants.

La largeur de cette zone est égale à la longueur de London (λ^L) définie sur la figure suivante :

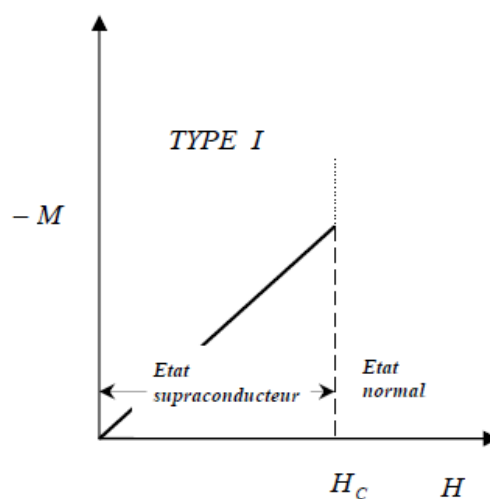


Figure I.5 : Courbes d'aimantation en fonction du champ appliqué d'un Supraconducteur de type I [1]

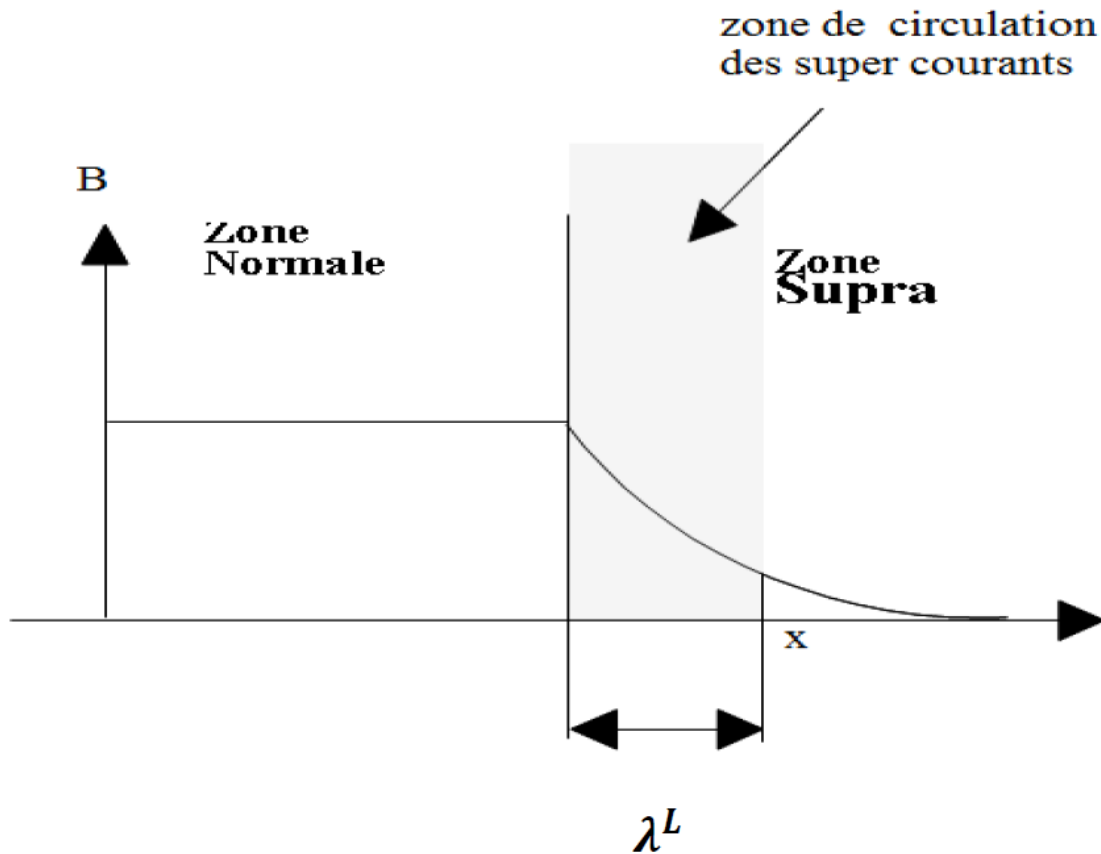


Figure I.6 : longueur de London [2]

I.2.1.3 Densité de courant critique

Pour les supraconducteurs de type I, il existe une valeur pour la densité de courant au-delà de laquelle le supraconducteur transite dans l'état normal. Cette valeur définit la densité de courant critique.

I.2.2 Type II

Exceptée pour les éléments Vanadium, Technétium et niobium, la catégorie des supraconducteurs de Type II est faite de composés métalliques et d'alliages. La découverte récente de composés supraconducteurs " pérovskites " (les céramiques métal-oxyde, qui ont normalement un ratio de 2 atomes de métal pour 3 atomes d'oxygène) appartient au groupe des Types II. [4]

Ils ont une Température critique plus élevée que le Type I par un mécanisme non encore entièrement compris. La sagesse conventionnelle maintient que cela est due aux couches planaires à l'intérieur de la structure cristalline. Bien que des recherches récentes suggèrent que cela est dû à des trous d'atomes d'oxygène sous-chargés dans les réservoirs de charge.

Les cuprates supraconducteurs (oxydes de cuivre) ont donné des températures critiques étonnantes hautes quand on considère qu'en 1985 la plus haute température critique atteignait seulement les 23K. Actuellement la plus haute de ces températures est 138K.

Une théorie prédit une limite autour de 200K pour les cuprates en couches. D'autres prédissent qu'il n'y a pas de limite. Quelle que soit la voie, il est à peu près certains que d'autres composés attendent encore d'être découverts au sein des supraconducteurs à haute température. [4]

Le premier composé supraconducteur de type II, un alliage de plomb et de bismuth, a été fabriqué en 1930 par W. de Hass et J. Voogd. Mais, il n'a été reconnu comme

supraconducteur que longtemps plus tard, après que l'effet Meissner n'ait été découvert. Le premier des oxydes supraconducteur a été créé en 1973 par DuPont avec le Ba (Pb, Bi) O₃ qui

à une température critique de 13K. Les supraconducteurs oxocuprates ont suivi en 1986. [14]

Les supraconducteurs de Type II (aussi nommés en anglais : "hard super-conductors") diffèrent du Type I dans le fait que leur transition d'un état normal à un état supraconducteur est graduel dans des régions d'état mixte. Un supraconducteur de Type II autorisera aussi de légères pénétrations par un champ magnétique extérieur dans sa surface. Ce qui générera quelques nouveaux phénomènes macroscopiques comme les "lignes" supraconductrices et le "vortex de flux fenêtré".

I.2.2.1 Température Critique T_c

Les supraconducteurs à haute température critique qui sont généralement les supraconducteurs de type II ont une température critique nettement supérieure.

Dans ce type de matériau, l'azote liquide (température de 77 K) est utilisé pour le refroidissement de ce type de matériau, ce dernier est caractérisé par un coût très faible par rapport à celui de l'hélium liquide. Le Tableau I.3 donne quelques exemples de ces matériaux ainsi que leur température critique. [1]

Tableau I.3 : Supraconducteurs à Haute température critique (SHT). [1]

<i>Supraconducteur</i>	T_c (K)
$\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{0.15}\text{CuO}_4$	35
$\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.5}\text{CuO}_4$	40
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	95
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	85
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	110
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	108
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_{10}$	125
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$	133-135

I.2.2.2 Champ critique

Il existe des supraconducteurs pour lesquels il est énergétiquement favorable de créer une cohabitation de zones normales et de zones supraconductrices lorsque le champ magnétique dépasse une certaine valeur appelée H^{c1} . Au delà de cette valeur de champ, le matériau est toujours supraconducteur, mais dans un état mixte.

L'état supraconducteur est maintenu jusqu'à une certaine valeur du champ magnétique appelée H^{c2} au-delà de laquelle la supraconductivité disparaît.

Ces supraconducteurs dits de type II sont, en général, des alliages ou des corps composés de plusieurs éléments comme, par exemple, le NbTi ou le BiSrCaCuO. [2]

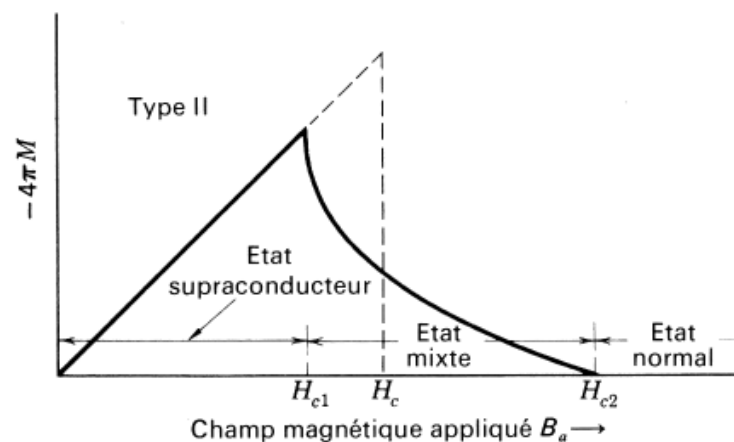


Figure I.7 : Courbe B(H) pour un supraconducteur de type II. [2]

Lorsque le supraconducteur est dans l'état mixte, une partie du champ magnétique le traverse. Il coexiste donc des zones normales et des zones supraconductrices. Ces zones normales appelées vortex laissent passer un quantum de flux h est la constante de Plank et e la charge de l'électron.

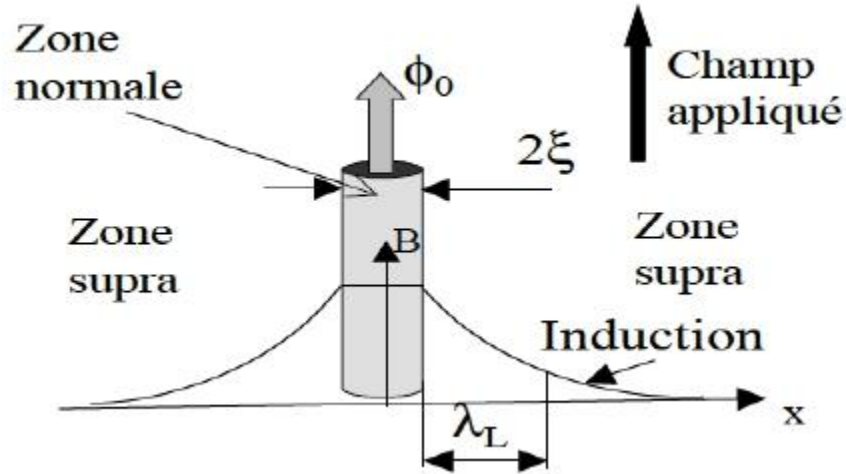


Figure I.8 : Constitution d'un vortex. [2]

I.2.2.3 Densité de courant critique

Au-dessus de H_{c1} , des vortex se développent. Si un courant se met à circuler dans le matériau, des forces de Laplace vont s'appliquer aux vortex et donc provoquer la mise en mouvement de tout le réseau. Ce déplacement des vortex génère une dissipation d'énergie pouvant provoquer la transition du matériau. Avec ce raisonnement, un supraconducteur de type II ne pourrait pas transporter de courant, et donc, la densité de courant serait nulle.

Pour remédier à ce problème, des sites d'ancrage pour les vortex sont insérés volontairement dans le matériau sous la forme d'impuretés ou de dislocations. Il suffit d'ancrer quelques vortex pour tenir le réseau entier, celui-ci étant relativement rigide. Nous pouvons alors définir la densité de courant comme étant celle qui provoque le « désencrage » des vortex et donc le déplacement du réseau. Nous pouvons donc définir deux modes de fonctionnement pour le supraconducteur:

- Si $J < J_c$, 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 ».
- 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 ». [2]

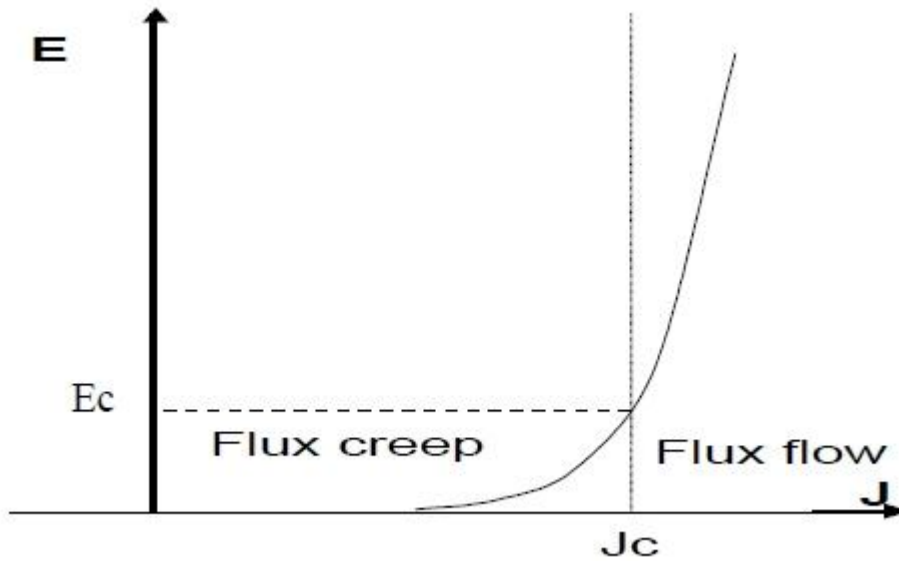


Figure I.9 : Caractéristique champ électrique densité de courant à T=0K. [2]

Les deux régimes de fonctionnement peuvent être représentés sur la caractéristique E(J) présentée sur la figure I.9 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 .

I.3 applications de la supraconductivité

I.3.1 Premier bilan

A la vue des trois parties antérieures, on peut affirmer qu'on se dirige fortement vers un fil supraconducteur pour une ou plusieurs applications dédiées.

Tableau I.4 : Matériaux supraconducteurs pour les applications en électrotechnique. [5]

		Matériaux				
		NbTi	Nb ₃ Sn	BSCCO	YBCO	MgB ₂
Applications	Médical	X				X
	Aimants fort champ	X	X		X	
	Limiteurs de courant			○	X	
	SMES	X		X		
	Lévitacion magnétique			X		
	Câbles de transport			X	X	
	Transformateurs	○		X	X	X
	Volants inertiels			X	X	X
	Moteurs électriques	○		X	X	X

I.3.2 Les applications médicales

Une application médicale est l'imagerie par résonance magnétique (I.R.M.). L'I.R.M. est basée sur le principe suivant : un noyau atomique doté d'un moment magnétique et soumis à une induction B_0 constante décrit un mouvement de précession autour de son axe avec une vitesse angulaire proportionnelle à B_0 . En appliquant un champ magnétique perpendiculaire à B_0 , on observe un phénomène de résonance si la fréquence d'excitation f est égale à la vitesse angulaire de précession. On recueille ainsi un signal caractéristique. L'induction de polarisation B_0 varie dans l'espace, et f aussi donc, ce qui permet l'obtention des images.

L'induction magnétique de 0,5 à 4 Teslas nécessaire ne peut être obtenue qu'avec l'aide d'aimants supraconducteurs. De plus, dès que la phase d'établissement du courant, l'alimentation électrique n'a plus lieu d'être. La consommation de " froid " est très faible et le poids de l'engin est réduit. Le grand gagnant est le patient : celui-ci ne subit aucun effet nocif connu à ce jour et les images prises de son corps (crâne, corps, membres ...) sont d'excellente qualité, ce qui permet aux médecins de faire un diagnostic correct.

Une autre application sur le même principe que l'I.R.M. est la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN). À la différence de l'I.R.M., deux champs magnétiques orthogonaux entrent en jeu (un à haute fréquence, l'autre continu). Sous leurs effets, les noyaux entrent en précession et émettent des signaux que l'on recueille ensuite pour l'analyse de la nature, la composition chimique et la structure des échantillons. Et comme il faut des inductions magnétiques supérieures à 7-13T, les aimants supraconducteurs sont extrêmement utiles. [4]

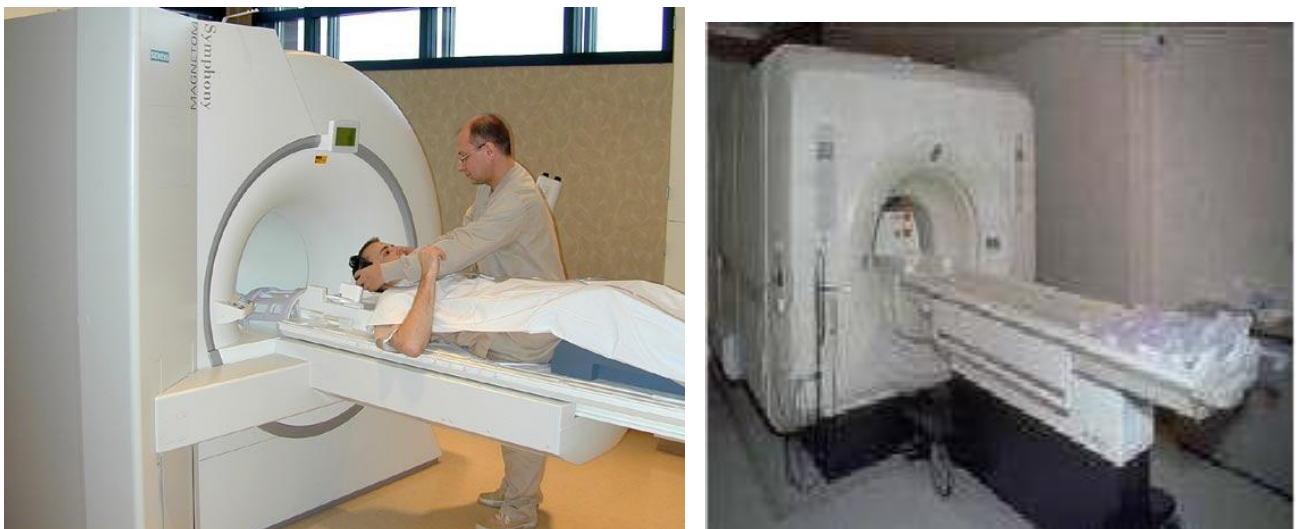


Figure I.10 : IRM (Imagerie Résonance Magnétique). [3]

I.3.3 Les aimants pour la recherche

Il y a les aimants pour les laboratoires, qui génèrent plusieurs Teslas. Ils permettent l'étude des propriétés physiques des matériaux sous l'effet de champs magnétique. Ces aimants supraconducteurs servent à l'étude de la supraconductivité. Des inductions de 31,35 Teslas ont été obtenues et cette valeur était le record mondial en 1993.

Ces aimants supraconducteurs servent aussi dans la physique des particules : pour pouvoir bien guider les particules, les maintenir sur des orbites définies, focaliser et recentrer les faisceaux. D'autres aimants servent à la détection de particules élémentaire émises lors des collisions dans les accélérateurs. On a donc des aimants supraconducteurs sur tout le parcours des particules. [4]

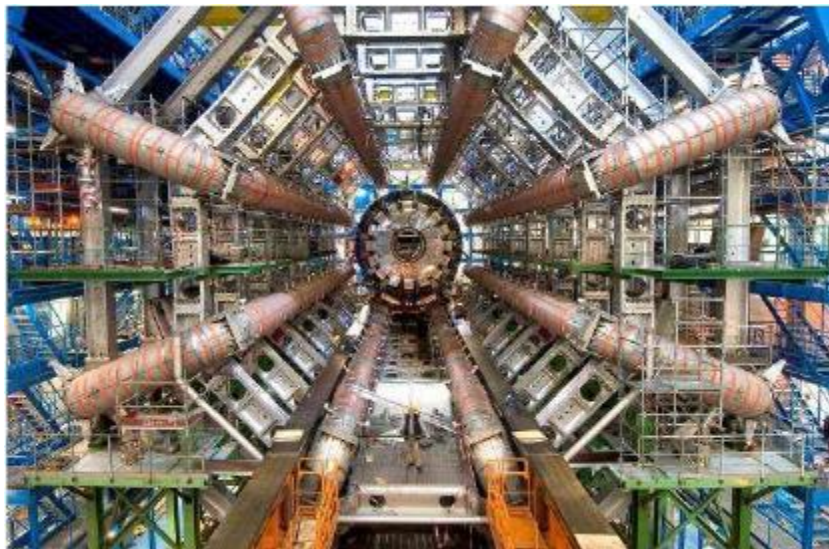


Figure I.11 : Aimant de détection ATLAS du LHC. [6]

I.3.4 Les tokamaks:

L'électricité d'origine nucléaire actuellement produite provient de la fission de noyaux d'atomes. On casse les gros noyaux et on en récupère l'énergie. Mais il existe aussi la fusion nucléaire (ce qui se passe dans le soleil par exemple) : des atomes légers se combinent pour former des atomes plus lourds. Il faut pour cela chauffer les noyaux très fortement (100 millions de degrés) . Il va de soi que les noyaux chauffés ne peuvent toucher aucune paroi : il faut les maintenir à l'état de plasma confiné dans un réacteur, et le tokamak est une voie prometteuse. ce confinement est obtenu par voie magnétique (sous forme d'un anneau torique), et encore une fois, comme il faut des inductions très élevées (dizaine de Teslas) et que les volumes concernés sont grands, les bobines toroïdales supraconductrices s'y prêtent à merveille. [4]

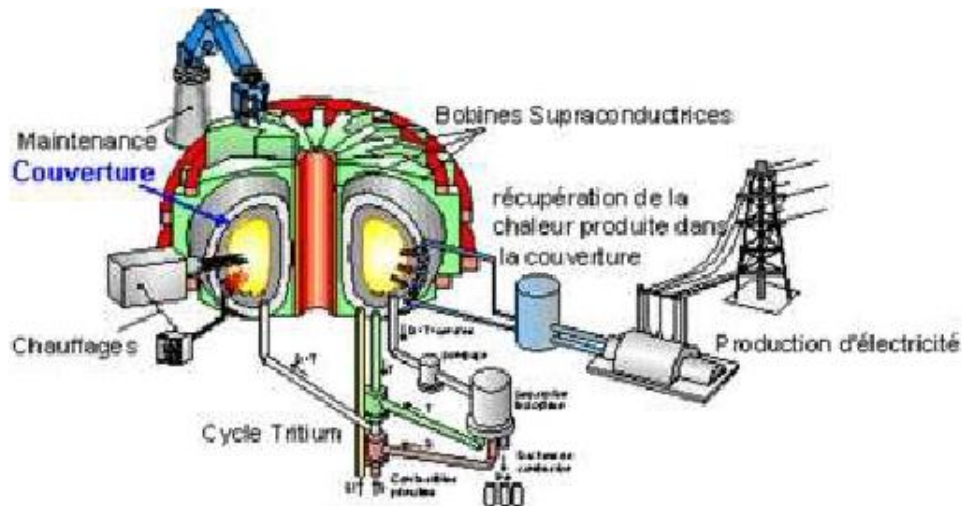


Figure I.12 : Principe d'un tokamak. [6]

I.3.5 Le stockage de l'électricité

Le seul moyen de conserver indéfiniment l'électricité serait son stockage sous forme magnétique, évidemment dans des bobines supraconductrices. A l'heure actuelle, l'énergie est stockée sous forme d'énergie primaire : pétrole, charbon, uranium, eau (dans les barrages), etc. Une fois transformée en énergie électrique, il faut la "consommer" de préférence avant la date limite : la fraction de seconde qui suit... [4]

I.3.6 Les trains à lévitation magnétique

Imaginons un train qui glisse quelques centimètres au dessus de la voie à plus de 500 km/h. Cela existe ! A l'échelle réduite, mais aussi à l'échelle 1 :1, au Japon. Pour propulser le train, il faut d'abord qu'il entre en lévitation. Deux méthodes sont possibles : la lévitation magnétique de type électromagnétique ou celle de type électrodynamique. La première ne fait pas appel à la supraconductivité, contrairement à la seconde. Cette dernière est basée sur la répulsion entre les éléments embarqués sur le train et des plaques conductrices (ou des bobines court-circuitées) situées sur la voie. L'avantage des bobines est de réduire la puissance dissipée.

L'entrefer (distance sol-train) peut être de 10 cm si les aimants du train sont suffisamment puissants. Il faut faire appel à la supraconductivité. Par interaction entre un inducteur embarqué et des bobines sur la voie, le train se meut pour le plus grand bonheur des ruminants. En 1977, le prototype ML 500 japonais atteignit la vitesse record de 517 km/h. Même le TGV Atlantique français ne put faire mieux treize ans après avec 515,3 km/h (chiffre qui reste cependant le record mondial de vitesse sur rails). Ces trains à lévitation présentent plusieurs avantages : outre le fait qu'ils circulent à de très hautes vitesses (ce qui raccourcit la durée des trajets), ils n'utilisent pas les voies (car il n'y a pas de contact direct), et le problème du captage du courant par pantographe ne se pose plus. Les contraintes des trains sur rails (contact pantographe caténaire, adhérence,

freinage, signalisation) n'autorisent pas aujourd'hui des vitesses commerciales au-delà de 500 km/h. Les trains à lévitation semblent donc prometteurs, mais les problèmes liés à leur mise au point (entre autres le problème du captage de l'énergie - il n'y a plus de contact !) et les infrastructures nécessaires font qu'aujourd'hui, les trains conventionnels ont encore de beaux jours devant eux. [4]



Figure I.13 : Maglev (Japon): septembre 2011. [6]



Chapitre II

II.1 Introduction

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu à étudier. Ces équations sont le couronnement de vieux concepts de la physique.

II.2 Equations de base et lois liées a la matière

C'est J. C. Maxwell (1831-1879) qui a apporté à l'étude de l'électromagnétisme la puissance d'un formalisme mathématique, précisant les notions qualitatives introduites par Faraday. Il parvient à établir le groupe d'équations qui portant son nom, et qui constituent toujours la base de nos connaissances théoriques de l'électromagnétisme. [13]

Dans ces formulations, J. C. Maxwell tenait à décrire des relations entre les grandeurs de l'électromagnétisme dans le cas général où l'espace et le temps ont une influence dans un milieu physique quelconque, avec une densité de courant \vec{J} variable et une distribution de charge ρ . Ces équations sont introduites comme postulats fondamentaux de l'électromagnétisme :

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Où :

\vec{E} : Champ électrique [V/m],

\vec{B} : Induction magnétique [T],

\vec{H} : Champ magnétique [A/m],

\vec{D} : Induction électrique [C/m²],

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Vecteur densité de courant de déplacement, négligeable aux basses fréquences
[A/m²],

\vec{J}_c : Densité du courant de conduction [A/m²],

ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m³].

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leurs joindre des relations qui définissent la matière ou le milieu à étudier :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{ou} \quad \vec{H} = \nu \vec{B} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

où :

μ : Perméabilité magnétique [H/m],

ν : Réductivité magnétique [m/H],

ε : Permittivité diélectrique [F/m].

σ : Conductivité électrique [S/m],

L'équation (II. 6) est définie dans un milieu diélectrique et l'équation (II. 7) est définie dans un milieu conducteur. Mais dans un milieu supraconducteur la relation entre le champ électrique et la densité du courant électrique est non linéaire, c'est-à-dire $\vec{J}_c = \sigma(\vec{E})\vec{E}$. [13]

II.3 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. [9]

Les équations se découpent donnant alors naissance à des modèles plus simples. Parmi ces modèles, nous citons : le modèle électrostatique, électrocinétique, magnétostatique, magnétodynamique [9].

II.3.1 Le Modèle électrostatique

Dans ce modèle, le champ \vec{E} est produit par des charges stationnaires qui ne varient pas en terme de répartition, et de valeur avec le temps. Ce modèle est régi par les équations suivantes [13] :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} &= \vec{0} ; & \text{car } \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= \vec{0} \\ \text{div } \vec{D} &= \rho \\ \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} \end{aligned}$$

La relation : $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0}$ permet de définir une fonction auxiliaire U appelée potentiel scalaire électrique, tel que : $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}U$

Ce modèle se ramène alors à l'équation suivante :

$$\text{div}(\varepsilon \overrightarrow{\text{grad}}U) + \rho = 0$$

II.3.2 Le modèle électrocinétique

Ce modèle est utilisé dans l'étude de la répartition du courant électrique de conduction dans des conducteurs isolés soumis à des différences de potentiel continues [7].

Il est régi par les équations :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} &= \vec{0} \\ \text{div } \vec{J} &= 0 \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} \end{aligned}$$

La relation : $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \vec{0}$; implique qu'il existe encore un potentiel électrique scalaire U (tension électrique), tel que : $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}U$

Le modèle se ramène alors à :

$$\text{div}(\sigma \overrightarrow{\text{grad}}U) = 0$$

II.3.3 Modèle magnétostatique

Dans ce modèle, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ de l'équation (II. 1) est nul. Ceci s'explique par le fait que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps. Deux modèles existent :

☞ *Modèle magnétostatique scalaire*

Dans ce cas, les courants électriques sont nuls, il vient alors que les champs ne dépendent pas du temps. D'après les équations (II. 2) et (II. 3), on obtient :

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{0}$$

$$\vec{\text{div}} \vec{B} = 0$$

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

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

Le modèle se ramène alors à l'équation :

$$\vec{\text{div}} \left(\mu \vec{\text{grad}} \Phi \right) = 0$$

☞ *Modèle magnétostatique vectorielle*

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

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J}$$

$$\vec{\text{div}} \vec{B} = 0$$

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

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

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$$

D'où le système d'équation :

$$\text{rot} \left(\nu \text{rot } \vec{A} \right) = \vec{J}$$

En tenant compte des relations de l'analyse vectorielle, l'équation précédente devient :

$$\begin{aligned} \text{rot} \left(\nu \text{rot } \vec{A} \right) &= \text{grad } \nu \times \text{rot } \vec{A} + \nu \text{rot rot } \vec{A} \\ &= \text{grad } \nu \times \text{rot } \vec{A} + \nu \left(-\Delta \vec{A} + \text{grad div } \vec{A} \right) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{rot} \left(\nu \text{rot } \vec{A} \right) &= \text{grad } \nu \times \text{rot } \vec{A} - \nu \Delta \vec{A} \\ &= \text{grad } \nu \times \text{rot } \vec{A} - \nu (\text{div grad}) \vec{A} \end{aligned}$$

Dans chaque région du dispositif étudié, la réductivité magnétique est constante c'est-à-dire $\text{grad } \nu = 0$, et à l'interface entre deux régions, on prend une réductivité moyenne.

L'équation précédente devient :

$$\text{rot} \left(\nu \text{rot } \vec{A} \right) = - \left(\text{div} \left(\nu \text{grad} \right) \right) \vec{A} = \vec{J}$$

II.3.4 Le modèle magnétodynamique

Dans ce cas, les sources du courant sont dépendantes du temps, ainsi, les champs électrique et magnétique seront alors couplés par la présence des courants induits (ou courants de FOUCAULT).

Le potentiel vecteur \vec{A} joue un rôle primordial, où la connaissance de \vec{A} implique la connaissance de toutes les autres grandeurs physiques où :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

En termes d'équations, nous avons :

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}$$

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

A ces équations, nous ajoutons les lois caractéristiques au milieu

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

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

C'est à partir de ces équations de base de ce modèle que nous pouvons déterminer l'équation décrivant l'évolution des phénomènes électromagnétiques dans un dispositif où l'ensemble des champs présents sont en fonction explicite ou implicite de l'espace et du temps.

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

II.4 Diverses méthodes numériques de discrétisation

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation pour la résolution des équations mathématiques établies, consiste à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution donne les valeurs et les distributions des grandeurs recherchées. Parmi ces méthodes nous citons :

II.4.1 Méthode des différences finis (MDF)

C'est la méthode la plus ancienne, connue depuis Gauss. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du

maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égales au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

II.4.2 Méthode des intégrales de frontière (MIF)

Elle est très utile lorsque le matériau est homogène et linéaire. Elle ramène le traitement de l'EDP dans l'ensemble du matériau à celui limité à la frontière du domaine. Ne nécessitant pas un maillage volumique ni matériau ni espace, elle est économique en taille mémoire et temps de calcul. Elle est souvent couplée à la méthode des éléments finis.

II.4.3 Méthode des circuits couplés (MCC)

Deux systèmes sont dits être analogiques lorsqu'ils obéissent aux mêmes équations et aux conditions aux limites identiques. Cela signifie que l'équation traduisant un des systèmes peut être transformée, pour exprimer le deuxième système, par simple changement des symboles et des différentes variables [8].

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

II.4.4 Méthode des volumes finis (MVF)

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

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

Pour calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, ...etc) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude [9].

Tout calcul par la méthode des volumes finis, dans une certaine mesure, utilise comme support spatial un maillage. Ce dernier sert à discrétiser le domaine où le problème est formulé en l'approchant par l'union des volumes de contrôle formant son maillage. Nous présentons les différents types de volume de contrôle utilisé par la méthode des volumes finis.

II.4.5 Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié (y compris l'espace environnant).

Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul long qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels.

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP). Cette méthode ne s'applique pas directement aux EDP, mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre, en utilisant l'une des deux approches suivantes :

La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.

La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié.

II.4.6 Le logiciel flux 2D

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des

machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés :

- Module **Construction (Preflux)** Il contient trois fonctions :
 - _ (**geometry & physics**) ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.
 - _ (**Circuit**) définit le schéma et les données du circuit électrique.
 - _ (**Materials database**) permet de choisir et de construire une banque de matériaux.

Ce module assure aussi le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation.

- Module **Solving Process**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (**Direct**) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.
- Module **Analysis**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc. [14]

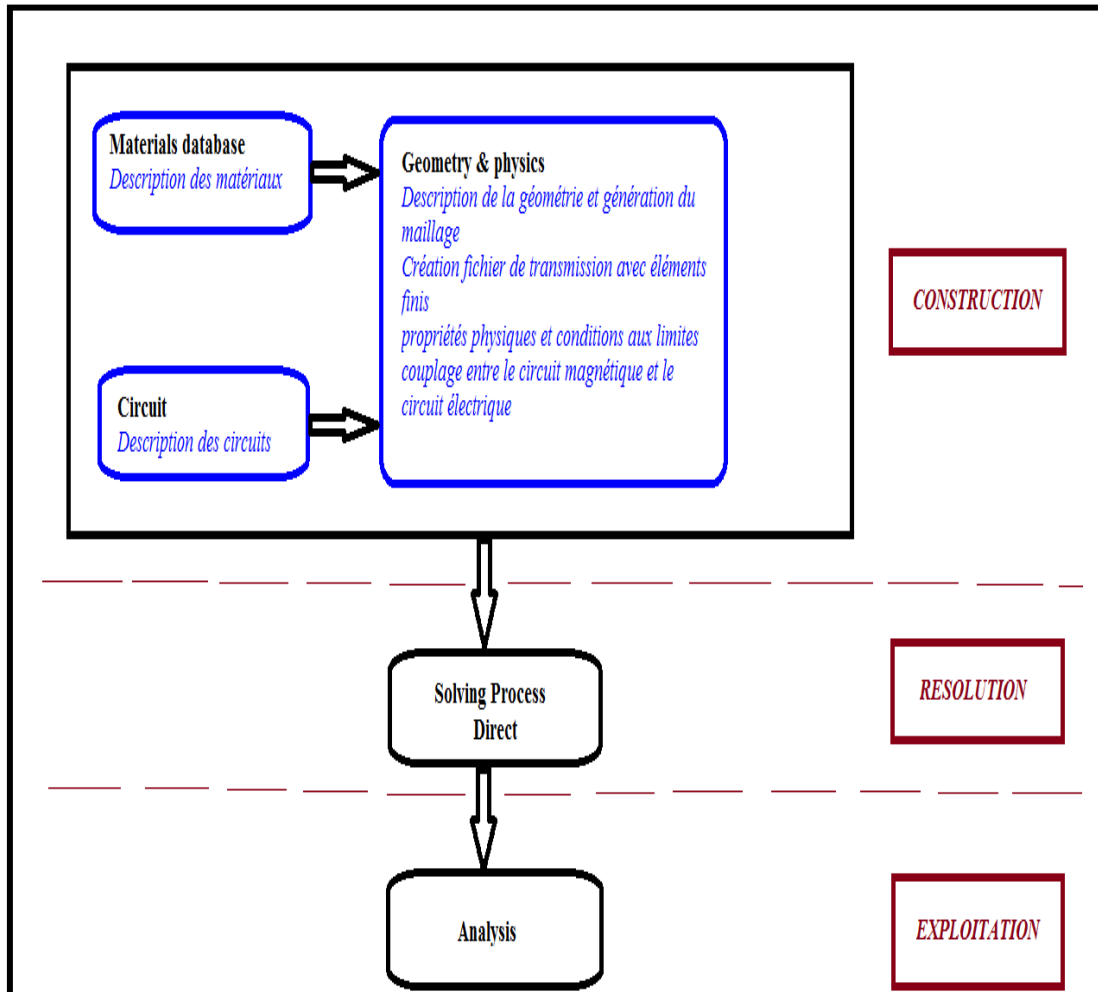


Figure II.1 : l'enchaînement des programmes de Flux 2D. [14]



Chapitre III

III.1 Les moteurs à courant continue sans balais

Le moteur brushless 'BLDC' ou encore le moteur sans balais est un moteur synchrone dont le rotor est constitué d'un ou plusieurs aimants permanents. La position du rotor est déterminée par un capteur de position qui est souvent un capteur à effet hall. Le rôle de ce dernier est d'assurer l'autopilotage du moteur c'est-à-dire l'orthogonalité du flux rotorique par rapport au flux statorique. Ces moteurs sont de grand usage, on les trouve dans les modèles réduits d'avions, d'hélicoptères et de voitures comme ils sont aussi utilisés dans l'industrie en robotique. [7]

III .1. 1 Principe de fonctionnement

Les moteurs brushless sont constitués de 3 éléments principaux :

- Une partie fixe, le stator, muni de trois groupes de bobines, appelées les trois phases du moteur. Ces bobines fonctionnent comme des électro-aimants et permettent de générer diverses orientations de champ magnétique.
- Une partie tournante, le rotor, muni d'aimants permanents. ces aimants vont en permanence entraîner le rotor pour tenter de s'aligner sur le champ magnétique du stator.
- Trois capteurs magnétiques à " effet Hall ". Ces capteurs permettent de connaître à chaque instant à position des aimants du rotor. [7]



Figure III.1 Photo réel d'un moteur C.C sans balais. [7]

Ces machines sont regroupé en deux grandes familles : des machines dont la fem est sinusoïdale et des machines dont les fem est trapézoïdale, mais ils sont identiques du point de vue structure. Nous étudierons plus particulièrement les moteurs brushless dont la forme de la fem est trapézoïdale. [7]

III .1. 2 Logique de commande

La logique de commande détermine la position du rotor à partir des capteurs à effet Hall. Elle en déduit l'orientation à donner au champ magnétique du stator. Au cours de la rotation, elle commande les trois bobines pour ajuster régulièrement l'orientation du champ à la position du rotor, de façon à entraîner celui-ci dans le sens choisi et avec un couple maximal.

Afin d'avoir un couple maximale et avec un minimum d'ondulation, il faut que les champs rotorique soit perpendiculaire au champ magnétique statorique.

La logique de commande permet de contrôler les trois phases du moteur BLDC à travers six Tirestoures en exploitant les sorties des capteurs à effet de Hall :

D'où le montage de fonctionnement du brushless suivant :

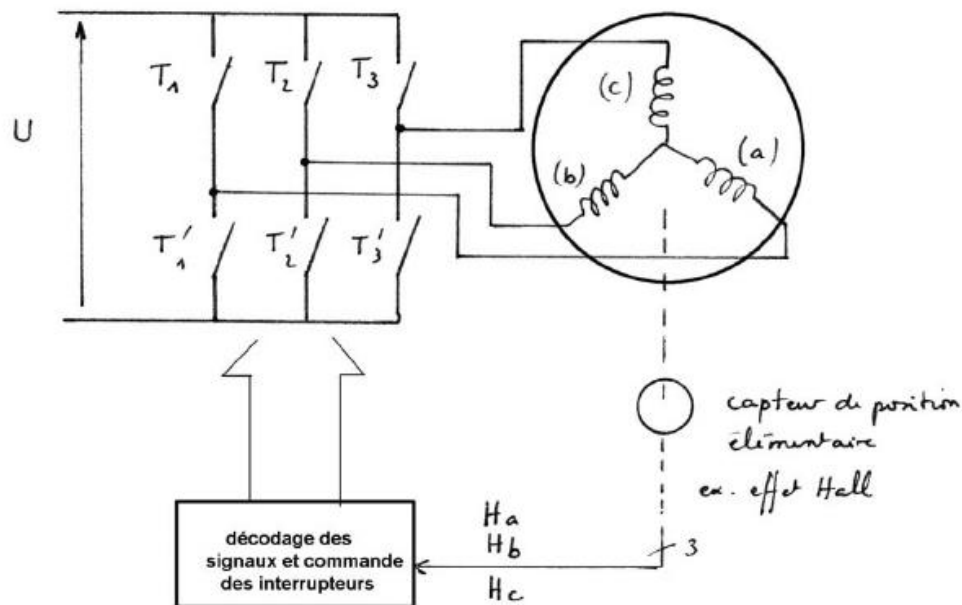


Figure III.2 Structure convertisseur-machine-capteur de position. [8]

La commande la plus fréquemment utilisée est dite commande à 120° elle fixe le passage du courant dans les phases à des angles de 120°. [8]

Le capteur de position délivre par exemple 3 signaux synchrones des f.e.ms comme le monte la figure ci-dessous :

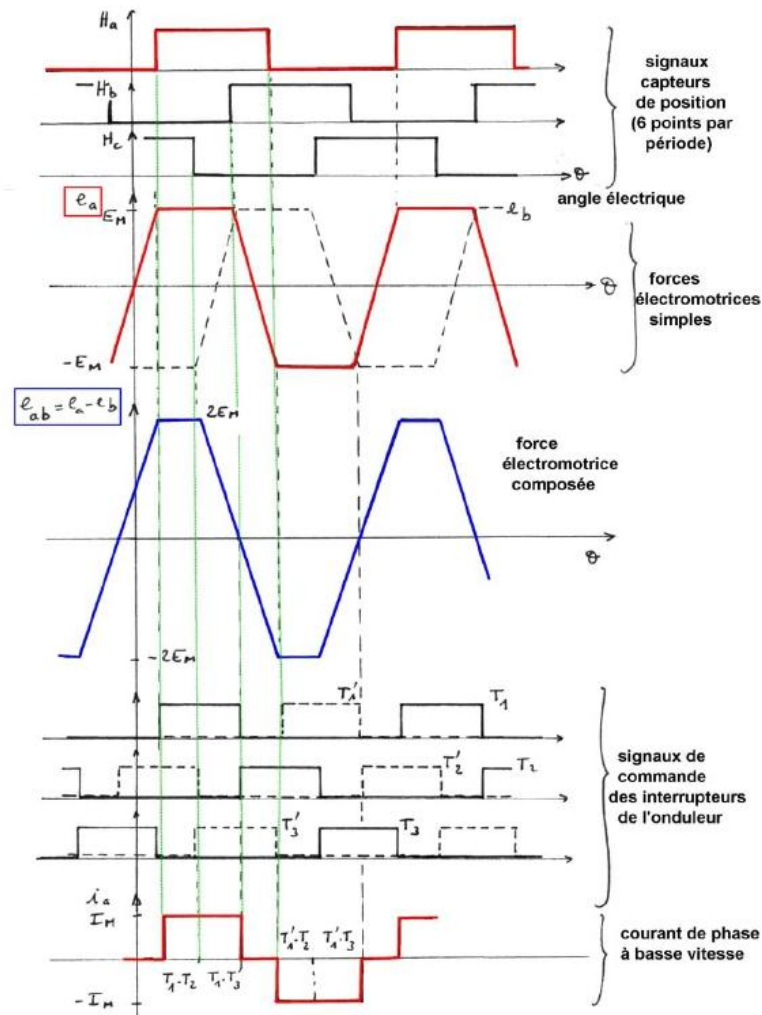


Figure III.3 Formes d'onde des machines [8]

III.2 Machines supraconducteurs

III.2.1 Moteur synchrone à aimants permanents

Les premiers moteurs synchrones supraconducteurs à aimants permanents ont été réalisés par le G2Elab (anciennement LEG) sous la direction de Pascal Tixador. Ces machines proposaient une structure à inducteur tournant composé d'aimant en Néodyme Fer Bore, et un induit fixe supraconducteur en Niobium Titane élaboré de bobines supraconductrices sur plusieurs diamètres (Fig. III. 5). L'induit ainsi façonné permet, grâce à une alimentation adéquate, de créer un champ magnétique tournant.

A la fin des années 90, deux réalisations ont été testées dans les locaux de l'institut Néel (CRTBT) à Grenoble, une première maquette de 15kW a apporté des résultats intéressants. Ainsi un second moteur a été conçu, avec des aimants permanents refroidis à 150K. Une puissance de 150kW a été atteinte avec cette machine en 1999. [5]

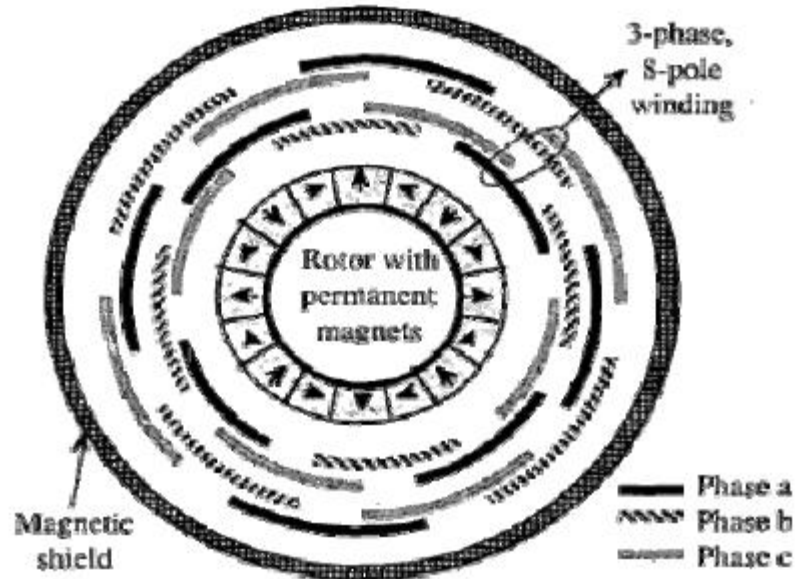


Figure III. 4 Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, principe. [5]

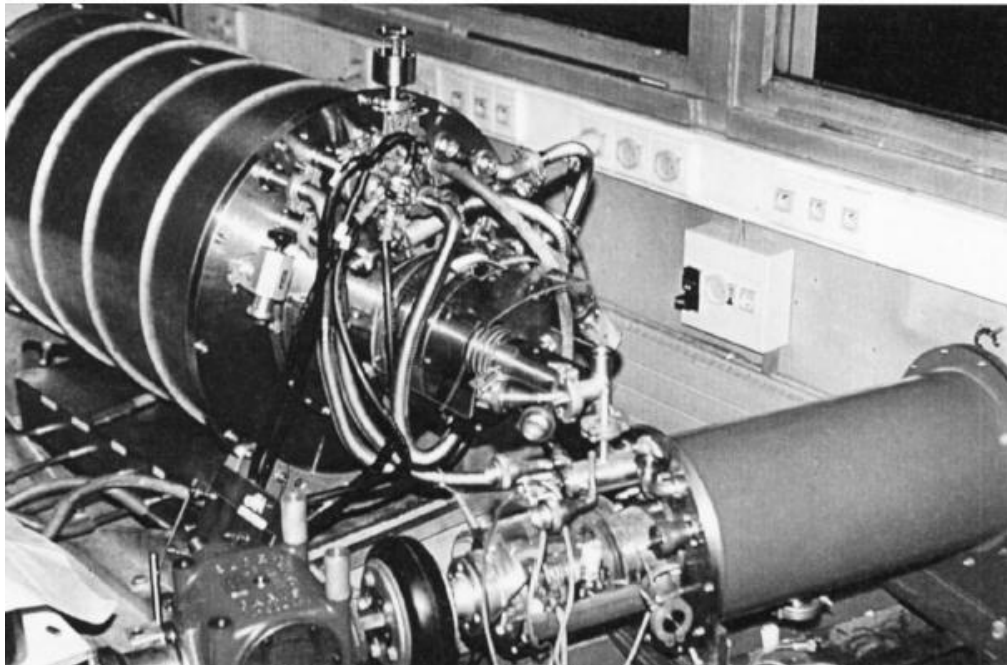


Figure III. 5 Moteur synchrone supraconducteur à aimants permanents, 15kW
750tr/min et 150kW 400tr/min. [5]

III.2.2 Moteur à griffe

Récemment des machines synchrones à griffes ont été réalisées par Central Japan Railway Company et Sumitomo, ces structures reposent sur une topologie classique de machine à griffe avec des solénoïdes supraconducteur à l'inducteur. Cette structure permet d'avoir une machine supraconductrice simple, avec des pôles fortement magnétisés (saturés), ce qui promet des solutions séduisantes pour les fortes puissances. [5]

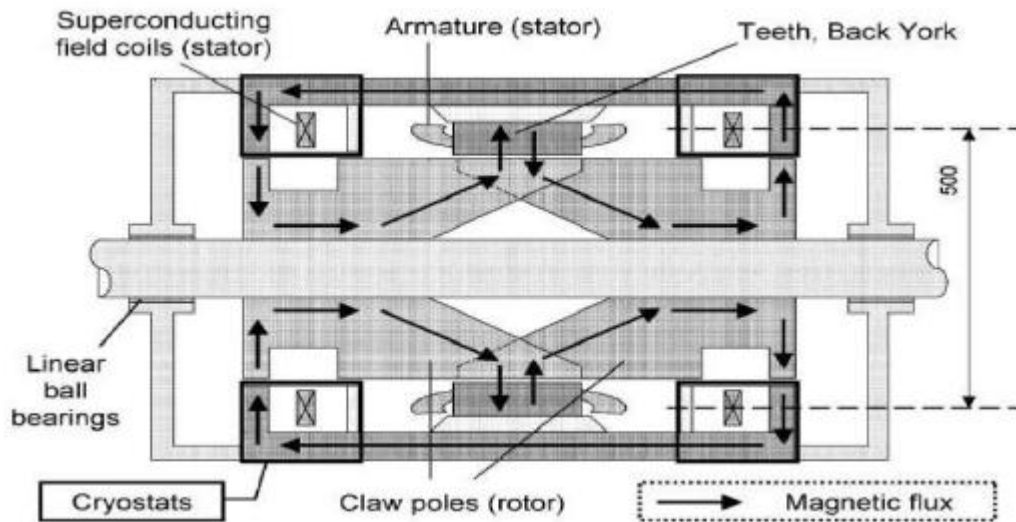


Figure III. 6 Coupe du moteur synchrone supraconducteur à griffe de Central Japan Railway Company. [5]

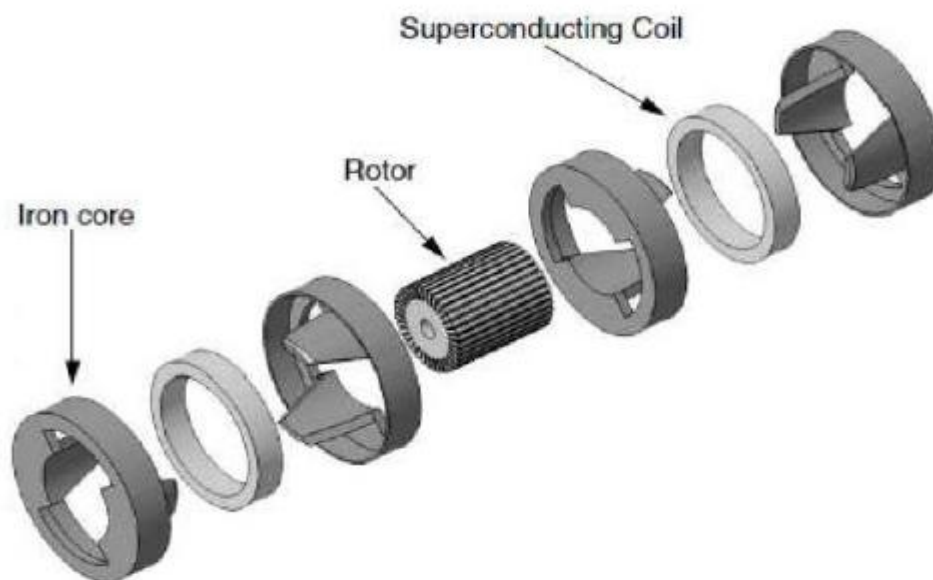


Figure III. 7 Vue éclatée de l'inducteur à griffe, Sumitomo. [5]

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

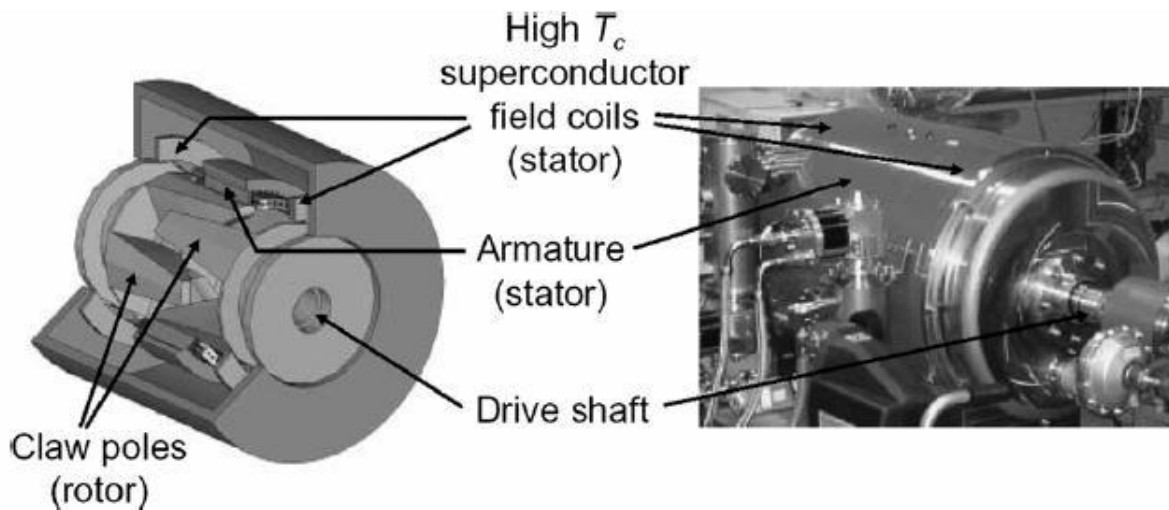


Figure III. 8 Moteur supraconducteur griffe, 13.6kW-500tr/min, Central Japan Railway Compagny. [5]

La machine griffe conçue par Sumitomo a été réalisée dans un projet de voiture électrique supraconductrice (Fig. III. 7), un condensé de technologie proposant une belle vitrine aux moteurs supraconducteurs. Une utilisation des dernières générations de BSCCO (Di-BSCCO) refroidis à l'azote liquide a permis de dimensionner un moteur de 18kW à 4500tr/min. La voiture « supraconductrice » a roulée 36km à 30km/h (Fig. III. 8).

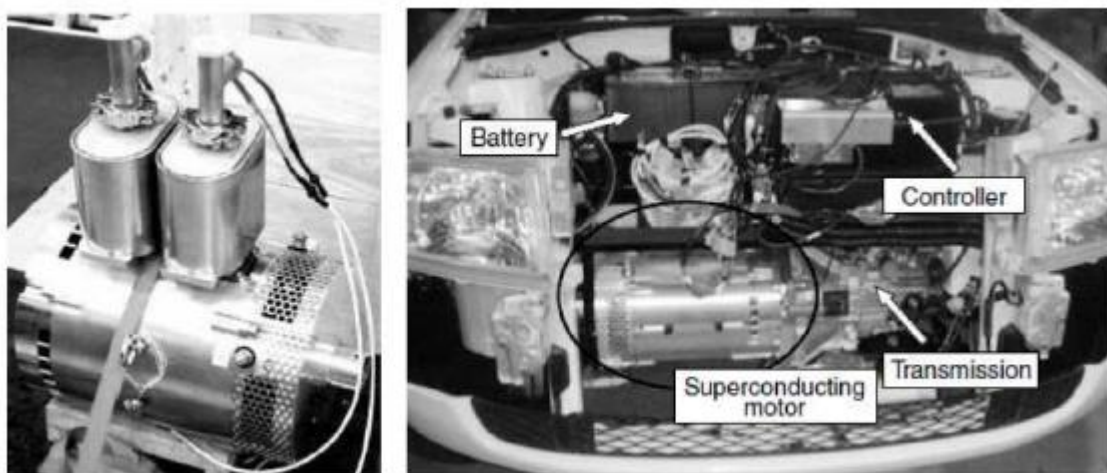


Figure III. 9 Moteur supraconducteur griffe, 18kW-4500tr/min, Sumitomo.[5]



Figure III. 10 Voiture électrique supraconductrice. [5]

III.2.3 Moteur à concentration de flux

Depuis 1998, plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans par le Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy (GREEN), plus particulièrement dans le cadre de deux thèses qui ont permis de valider un principe de machine électrique sur un inducteur modèle, puis de réaliser un moteur de 20kW-750tr/min.[5]

Les travaux menés par P. Masson ont permis, après une étude sur la concentration de flux magnétique entre des écrans supraconducteurs, de proposer une géométrie de machine à 8 pôles. (Fig. III. 13).

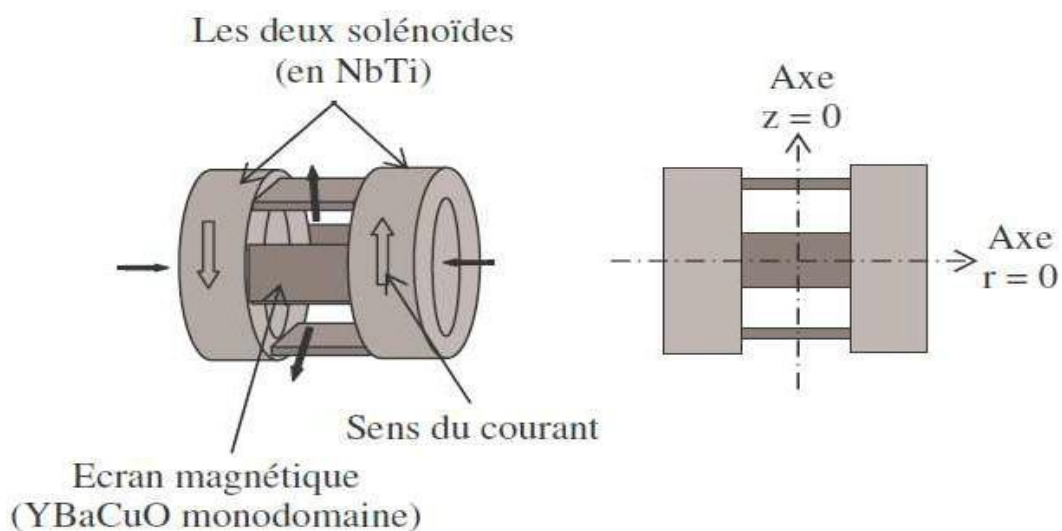


Figure III. 11. Structure de l'inducteur. [5]

Les solénoïdes, bobinés en sens inverses, permettent de créer un flux magnétique axial important, qui se trouve concentré entre les plaques supraconductrices et génère une induction

magnétique à forte composante radiale dans l'entrefer, supérieure à la valeur sans écrans magnétiques. Le choix des matériaux a été effectué selon les facilités du laboratoire à les obtenir. Le moteur a été totalement dimensionné, à la conception pour aboutir aux essais. Ainsi, le choix s'est porté sur des bobinages en NbTi et des écrans en YBCO (Fig. III. 11), l'ensemble fonctionnant à l'hélium liquide, ce qui permet d'utiliser au mieux les propriétés de ces supraconducteurs. Ce moteur à concentration de flux magnétique a été réalisé sous forme de machine inversée, de manière à avoir une partie cryogénique fixe. Les essais moteurs (Fig. III. 12) ont permis de valider ce principe, et de faire apparaître un couple massique des plus élevés en machine supraconductrice.

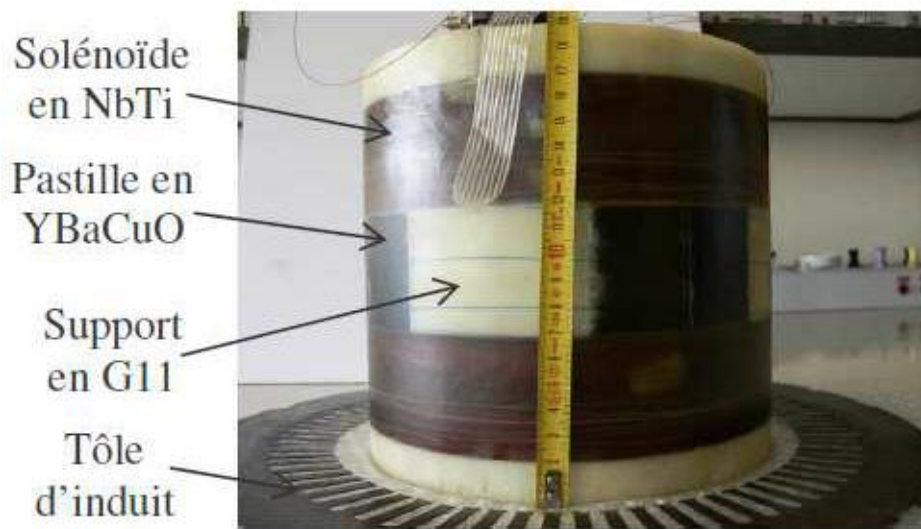


Figure III. 12 Inducteur supraconducteur réalisé. [5]



Figure III. 13 Moteur supraconducteur à concentration de flux, 20kW-750tr/min. [5]



Chapitre IV

IV.1 Introduction

Le chapitre suivant a pour objectif de modéliser le comportement magnétodynamique d'un aimant supraconducteur utilisé dans une machine à courant continu sans balais (à aimant). Ce dernier permet de créer un champ magnétique intense. Les résultats de simulations à caractère magnétique seront largement présentés. Ces résultats sont obtenus à partir de logiciel Flux-2D. L'objectif principal de ce chapitre est de montrer la valeur du champ d'induction magnétique créée par l'insertion des aimants supraconducteur dans la machine étudiée d'une part et d'autre part de montrer l'influence de l'effet magnétique sur le comportement magnétique de la machine. Dans ce contexte, nous avons proposé d'étudier deux types de machines. La première machine est une machine à pôles saillants où les saillants sont des aimants. Par contre, la seconde est une machine à pôles lisses où les aimants sont enterrés dans le circuit magnétique de rotor.

IV.2 Machine à aimant à pôles saillants

IV-2-1 Description du système

Le problème que nous allons étudier consiste à la résolution de l'équation du modèle magnétodynamique dans une machine à aimant à pôles saillants. Les dimensions de cette machine sont données dans le tableau VI. 1 et la géométrie est illustrée dans la figure IV.1.

Paramètres de la machine	Dimensions (mm)
Rotor	25.154
Stator	25
Entrefer	0.503
L'épanouissement polaire	150°
L'arbre	9.003
Longueur de l'aimant	6.987
Longueur de l'encoche	12.07
La distance entre les encoches	2.76

Tableau IV.1 : Dimensions de la machine.

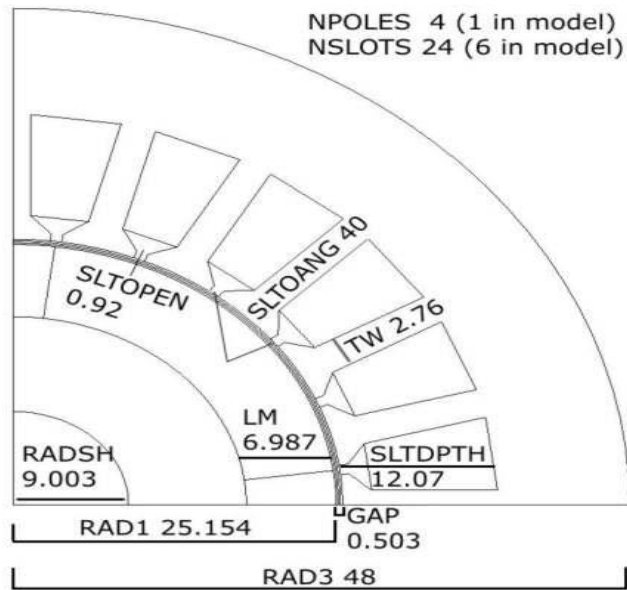


Figure IV.1 : Le modèle de la machine à aimant à pôles saillant. [15]

Afin de montrer l'influence des aimants supraconducteurs sur la répartition du champ magnétique dans la machine. Nous avons modélisé les phénomènes électromagnétiques produites au sein de la machine dans les deux cas suivants :

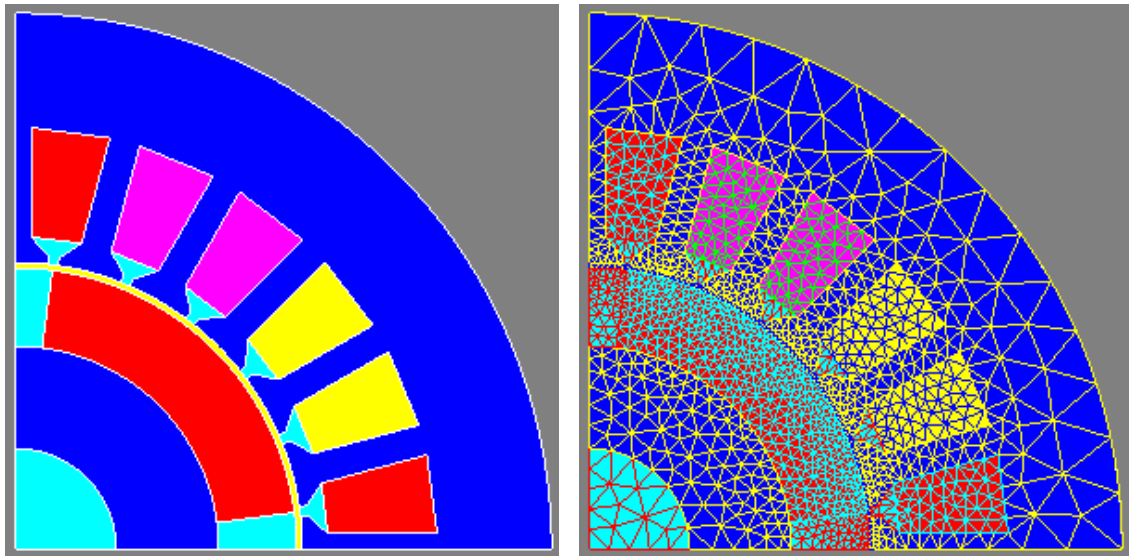
- Machine à aimant permanent conventionnelle $B_r \leq 1.3T$
- Machine à aimant supraconducteur $B_r > 1.3T$

La comparaison entre la répartition de champ magnétique au sein de la machine dans les deux cas, permet de déduire l'intérêt des aimants supraconducteurs dans les machines électriques.

IV-2-2 Résultats de simulations

Le logiciel Flux-2D est dédié principalement à la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les machines électriques. Ce logiciel est basé sur la méthode des éléments finis comme une méthode de résolution de système d'équations aux dérivées partielles. Le post processeur du Flux-2D permet de visualiser en 1D et 2D les diverses grandeurs magnétiques.

La figure IV. 2 (a-b) représente respectivement le un quart (1/4) de la géométrie et le maillage triangulaire de la machine étudiée.



(a)

(b)

Figure IV.2 (a-b) : Le un quart (1/4) de la géométrie et le maillage triangulaire de la machine étudiée

Sachant que notre machine étudiée est alimenté par une tension de 24v à partir d'un convertisseur comme il est illustré dans la figure suivante :

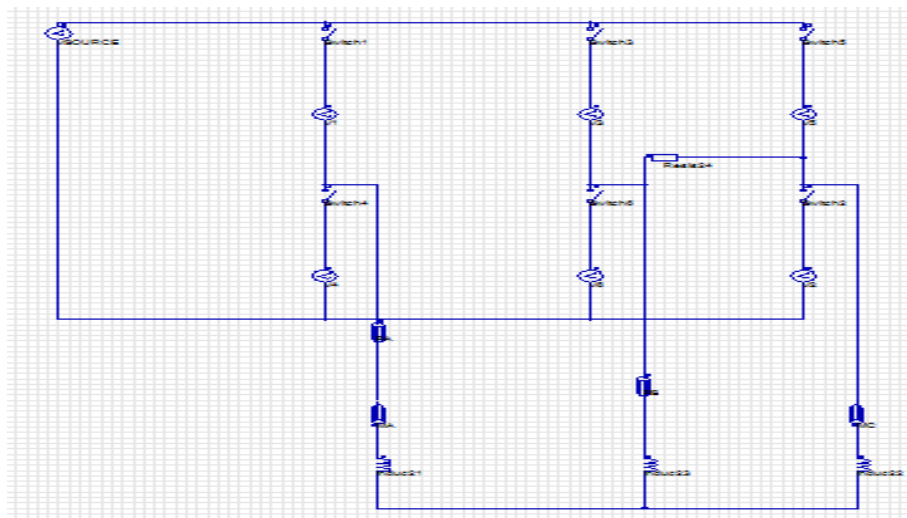


Figure IV.3 : Le circuit de commande.

La figure IV. 4 représente la répartition des lignes du flux magnétique dans la machine pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.404T$

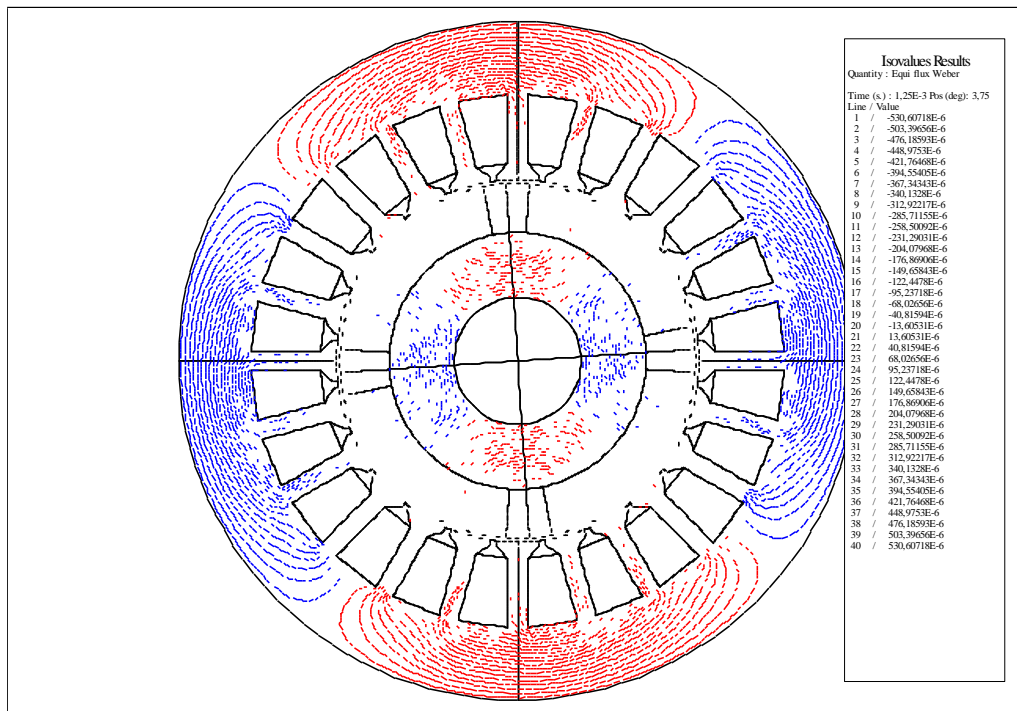


Figure IV.4 : La répartition des lignes du flux magnétique dans la machine.

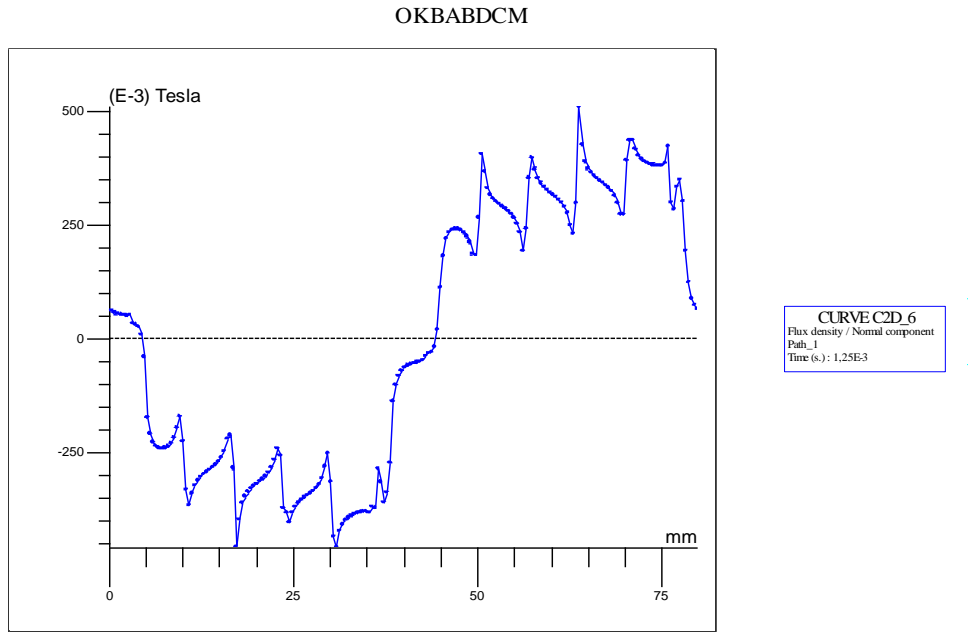
La figure IV. 5 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

La figure IV. 6 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.

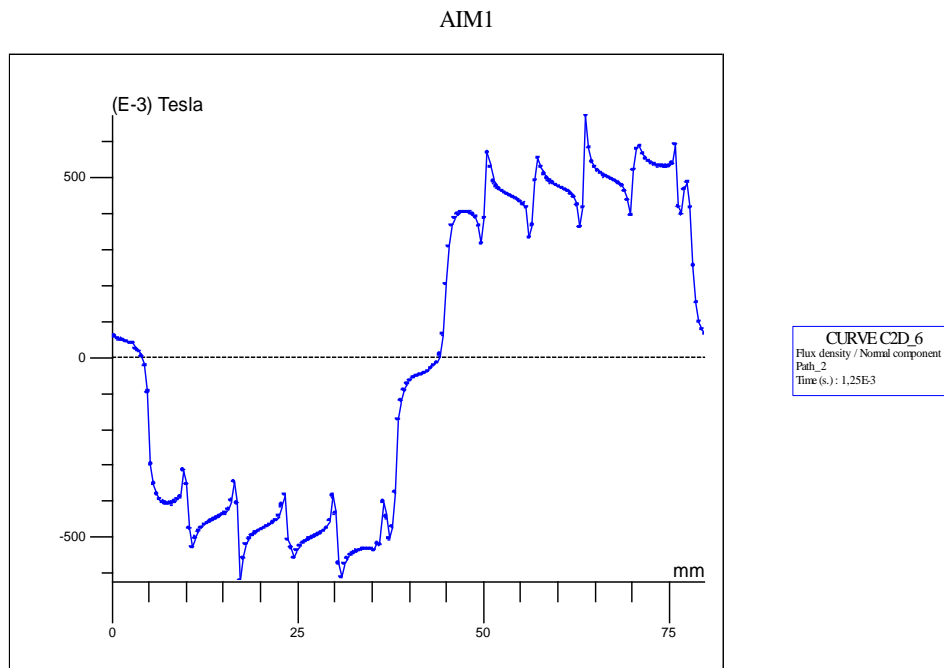
La figure IV. 7 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$.

La figure IV. 8 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

La figure IV. 9 représente la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

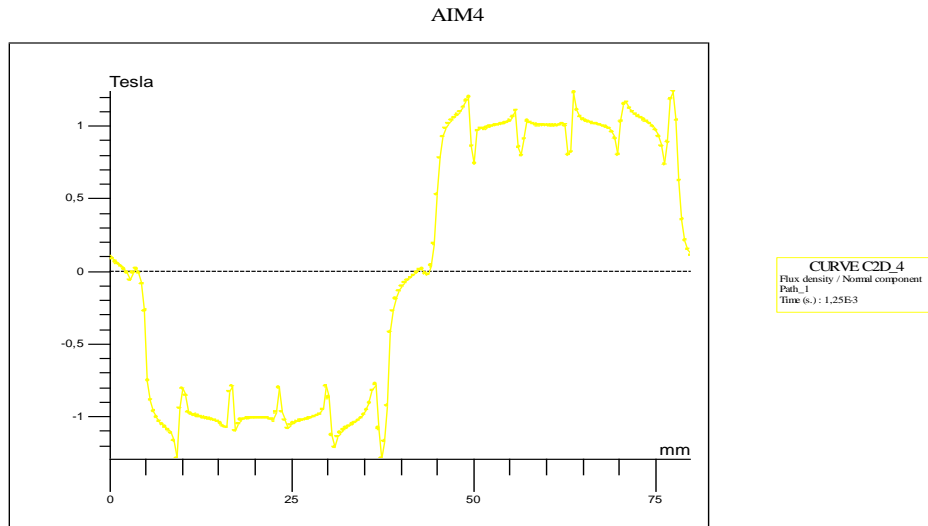


(a)

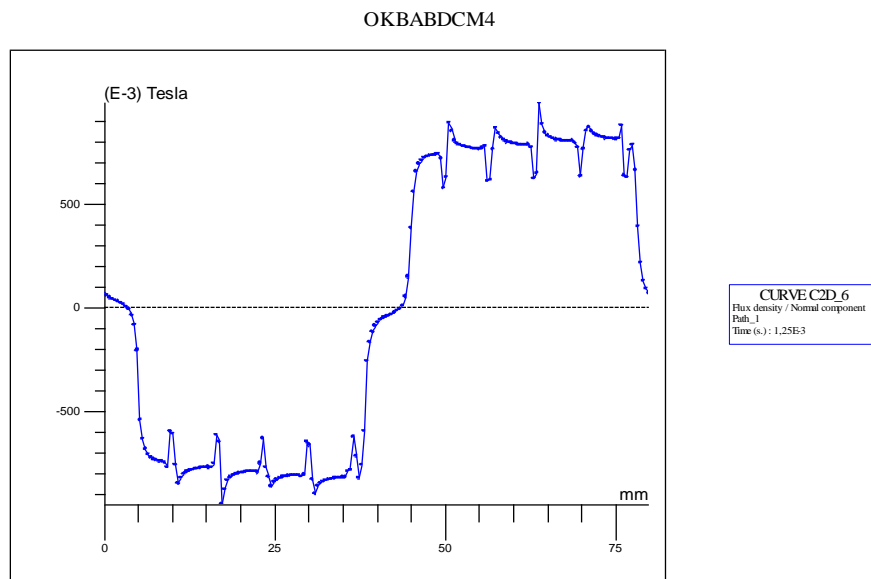


(b)

figure IV. 5 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

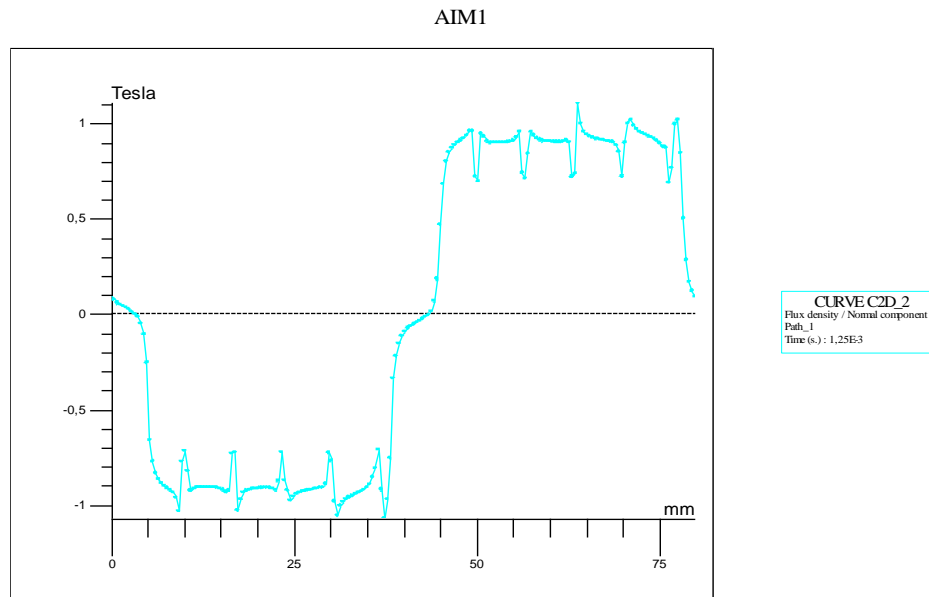


(a)

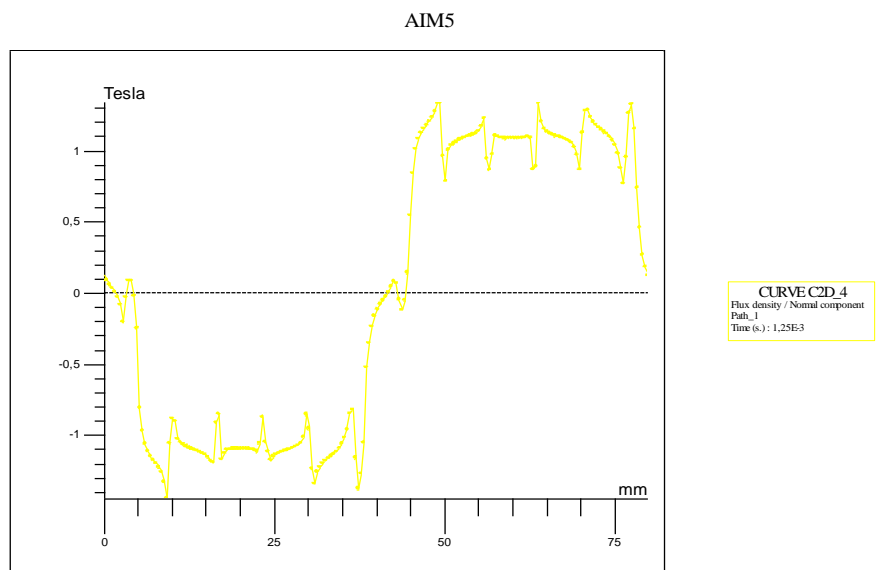


(b)

figure IV. 6 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanant conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.

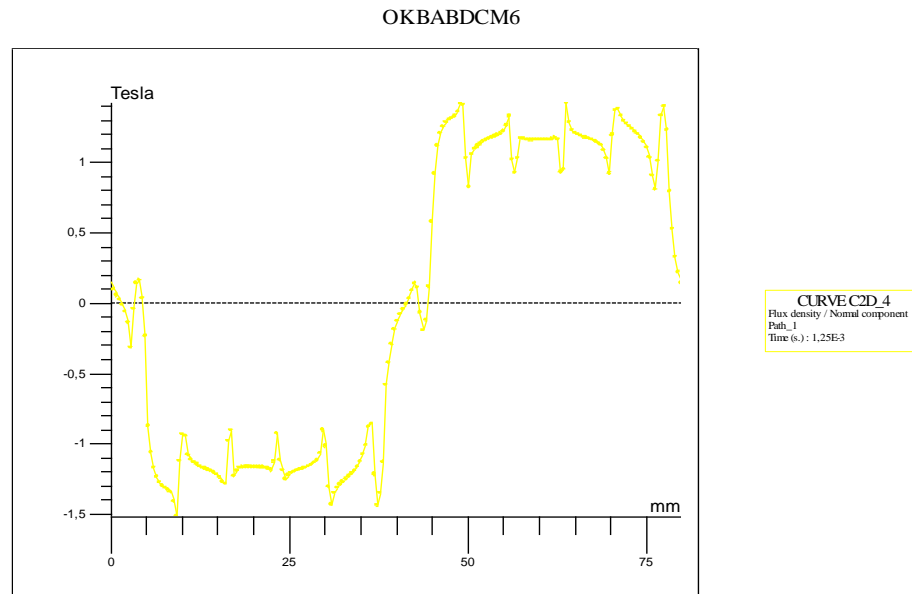


(a)

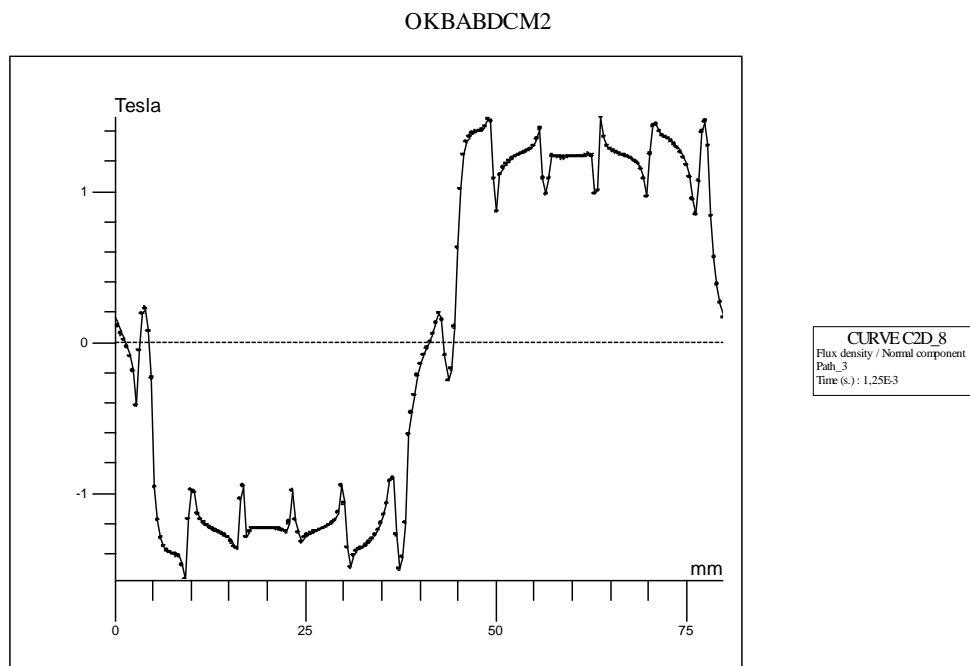


(b)

figure IV. 7(a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.2T$ et $1.4T$.



(a)



(b)

figure IV. 8(a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

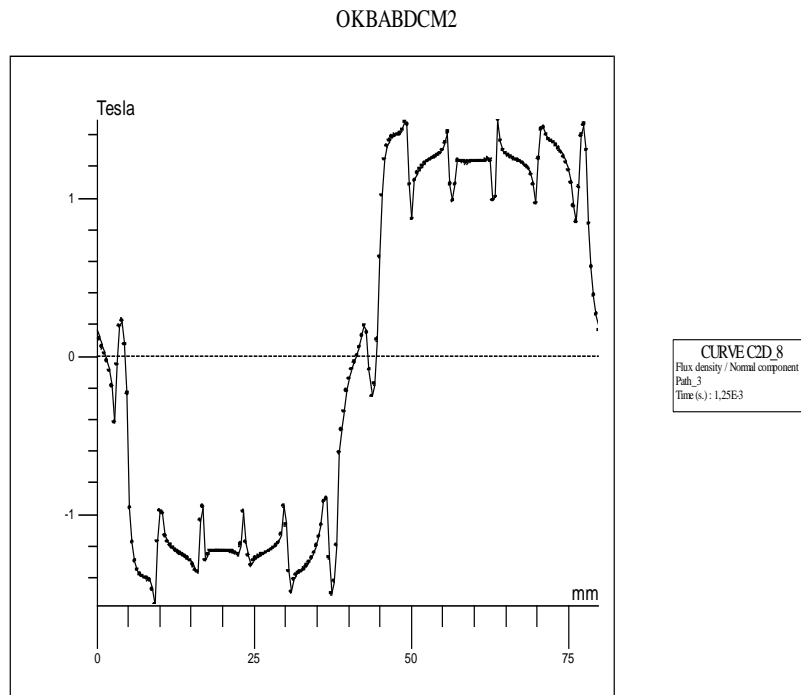


figure IV. 9(a-b): La variation spatiale de l'induction magnétique obtenue pour un aimant permanent supraconducteur avec $B_r = 2T$.

La figure IV. 10 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

La figure IV. 11 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.

La figure IV. 12 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$.

La figure IV. 13 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

La figure IV. 14 représente la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

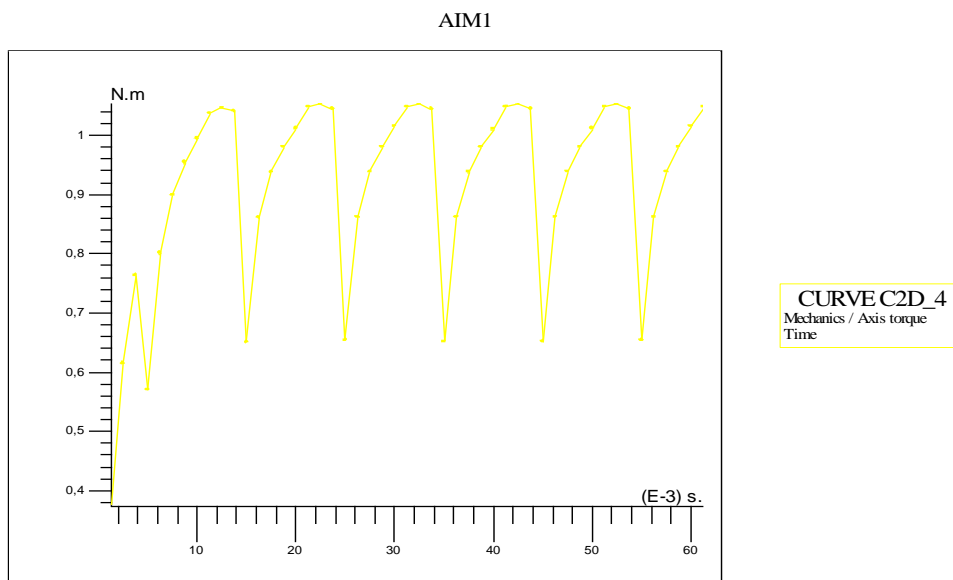
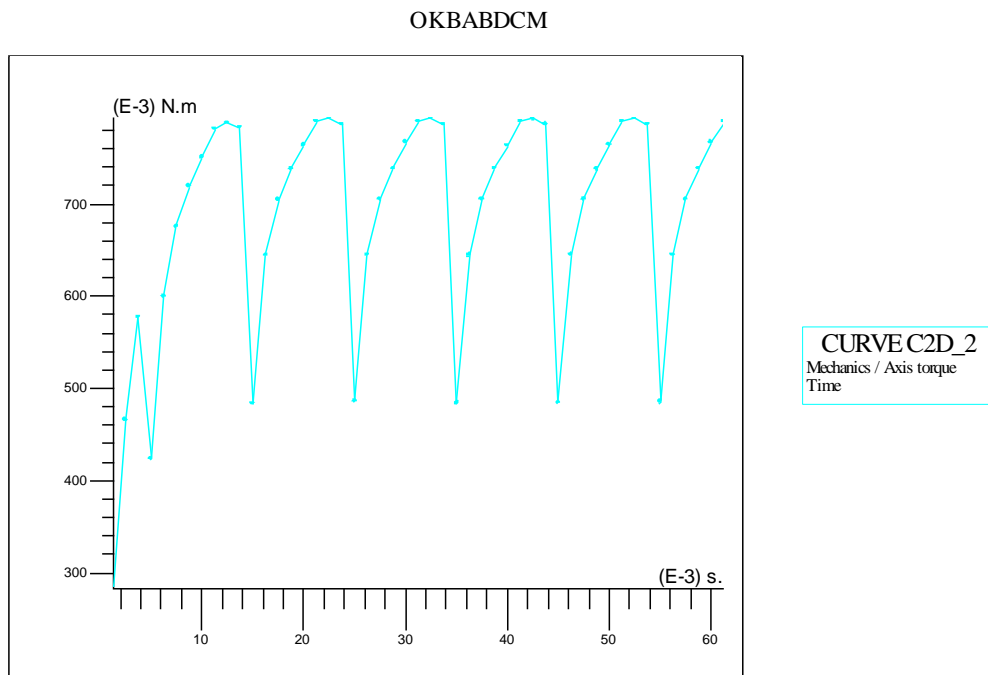
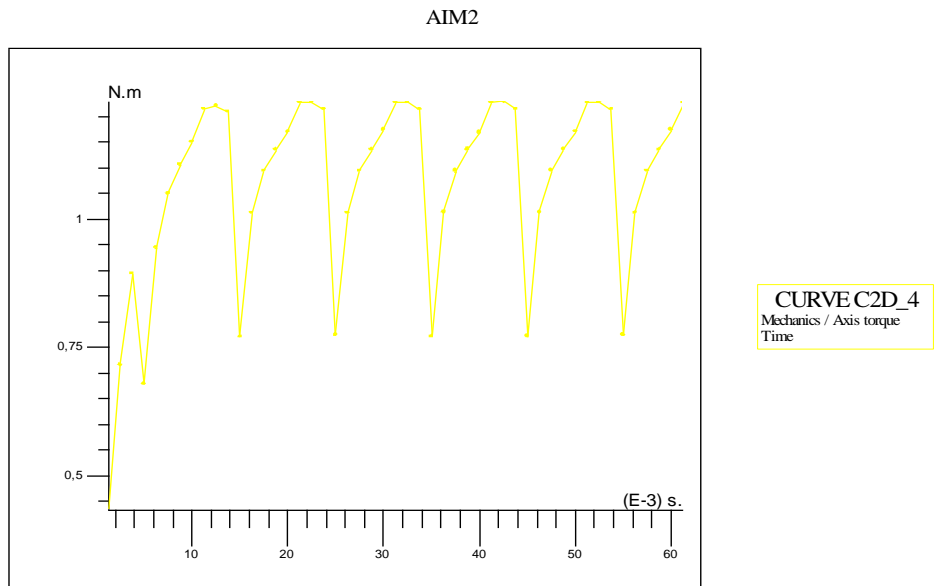
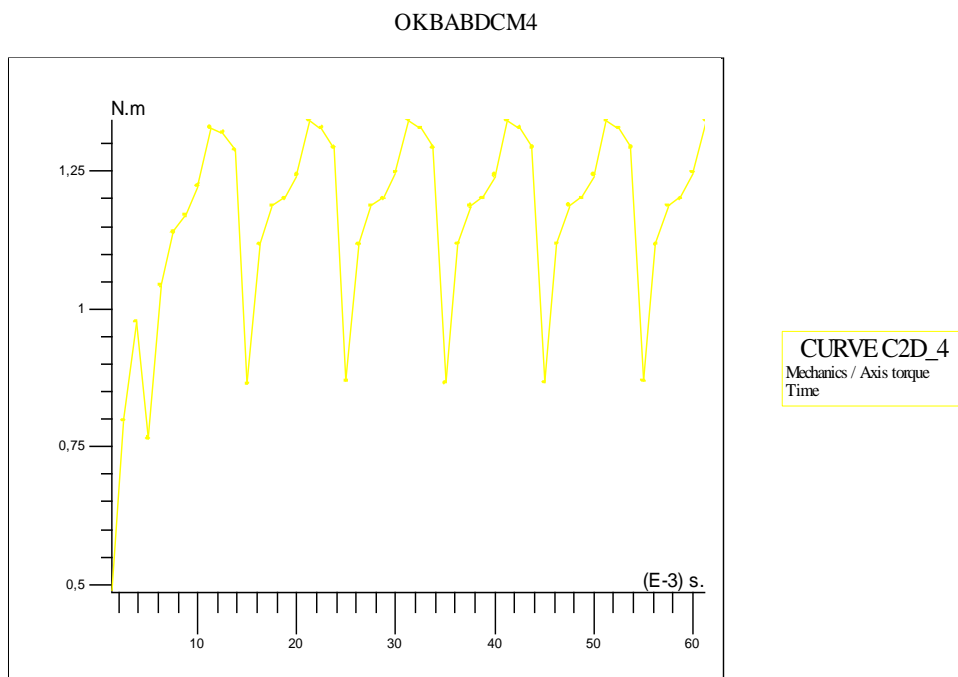


figure IV. 10 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanente conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

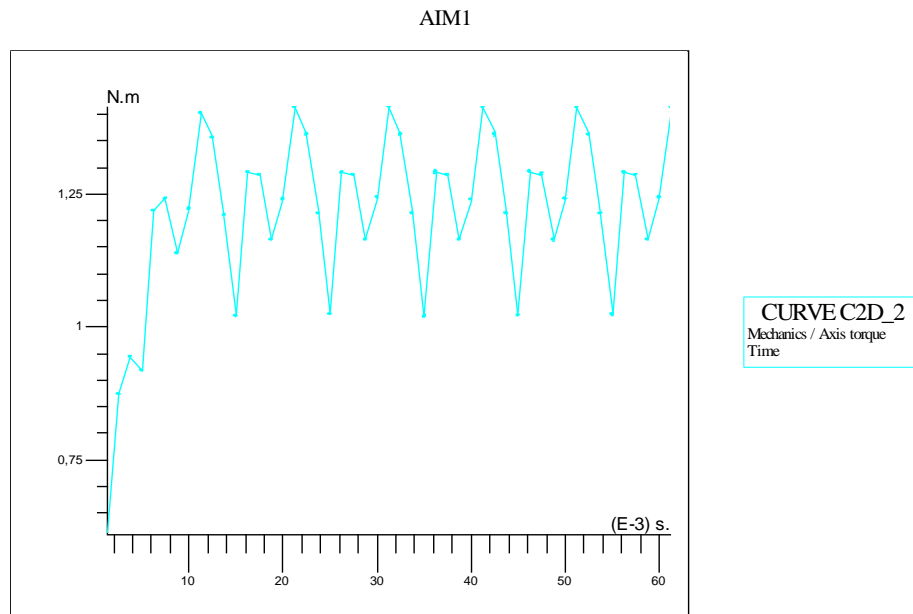


(a)

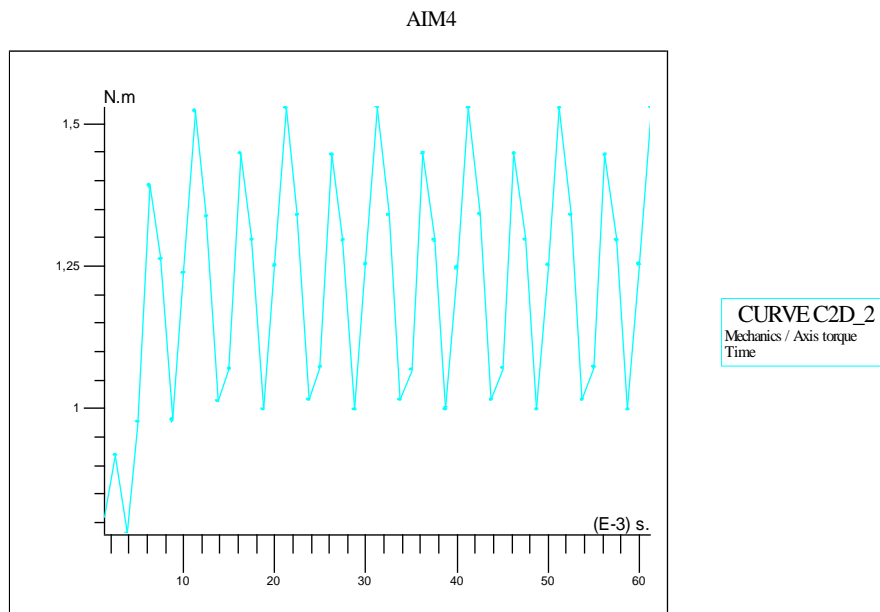


(b)

figure IV. 11(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.

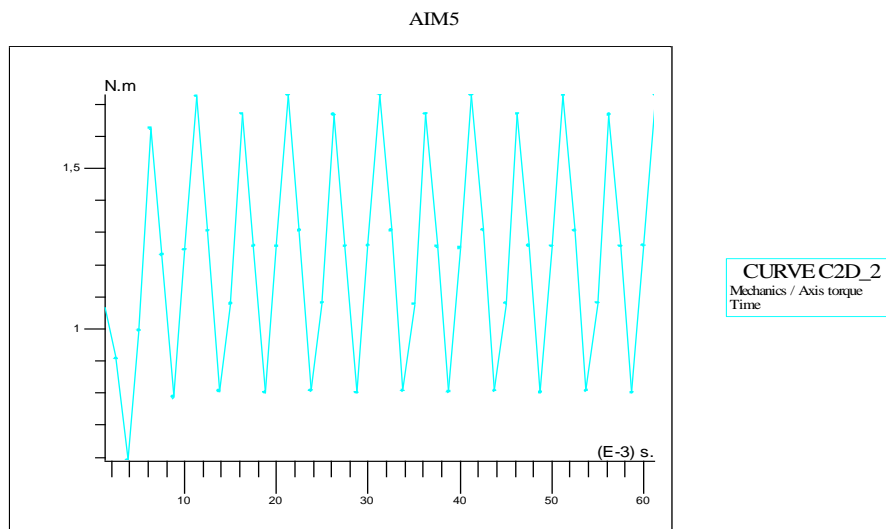


(a)

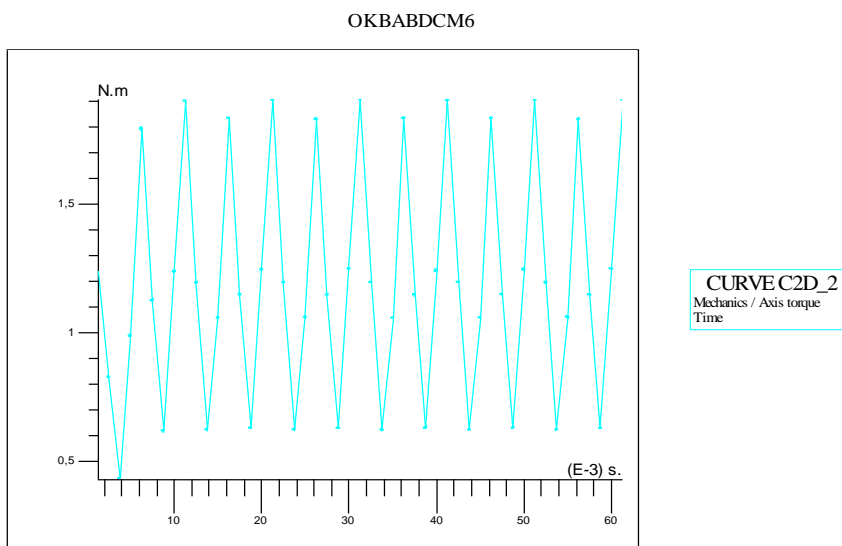


(b)

figure IV. 12(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanente conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$.



(a)



(a)

figure IV. 13(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

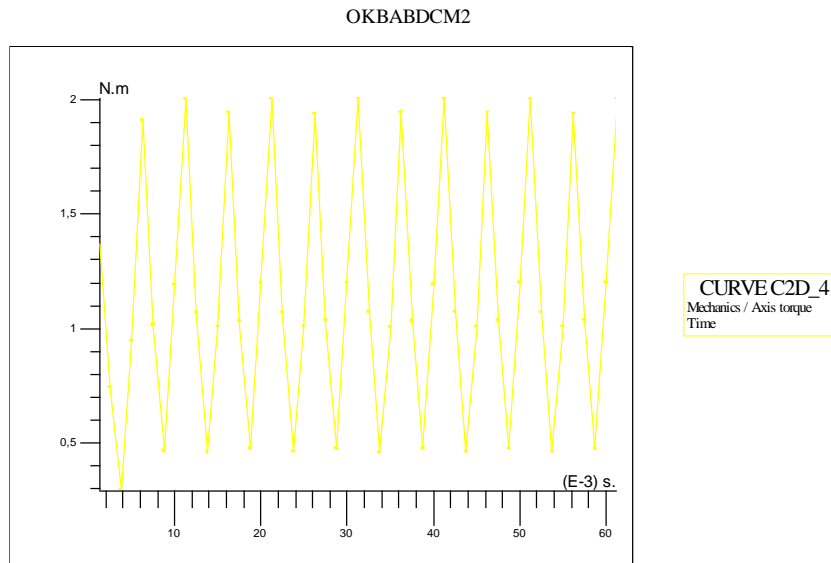


figure IV. 14(a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

IV-2-3 Interprétations

Par la comparaison entre les résultats présentés dans les figures IV. 5, IV. 6, IV. 7, IV. 8 et IV. 9, on peut dire qu'il existe vraiment une différence entre l'induction magnétique au sein de la machine à pôles saillant obtenus par les aimants supraconducteurs avec celle obtenus par les aimants conventionnels. En effet, le maximum de l'induction magnétique à l'intérieur de la machine étudié atteint la valeur de $1.1T$ pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$, alors qu'il atteint la valeur de $1.4T$ pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.8T$. Et à partir de cette valeur, l'induction magnétique au sein de la machine prend des valeurs quasiment constantes c'est-à-dire, le circuit magnétique est saturé.

Pour vérifier l'efficacité d'implémenter les aimants supraconducteurs au sein de la machine à pôles saillant, nous avons comparé le couple électromagnétique obtenus pour les deux cas (aimant permanent conventionnelle et aimant supraconducteur). Cette comparaison est présentée dans les figures IV. 10, IV. 11, IV. 12, IV. 13 et IV. 14. On peut dire que l'insertion des aimants supraconducteurs améliore et augmente le couple électromagnétique de la machine. En effet, le couple électromagnétique atteint un maximum de $1.4N.m$ pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$, par contre il atteint un maximum de $2N.m$ pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

IV-3 Machines à aimant à pôles lisses

IV-3-1 Description du système

Les dimensions de cette machine sont les mêmes présenté précédemment et la même chose pour le circuit de commande. La différence est dans la géométrie du rotor où les aimants sont enterrés dans le circuit magnétique du rotor.

IV-3-2 Résultats de simulations

La figure IV. 2 (a-b) représente respectivement le un quart (1/4) de la géométrie et le maillage triangulaire de la machine étudié.

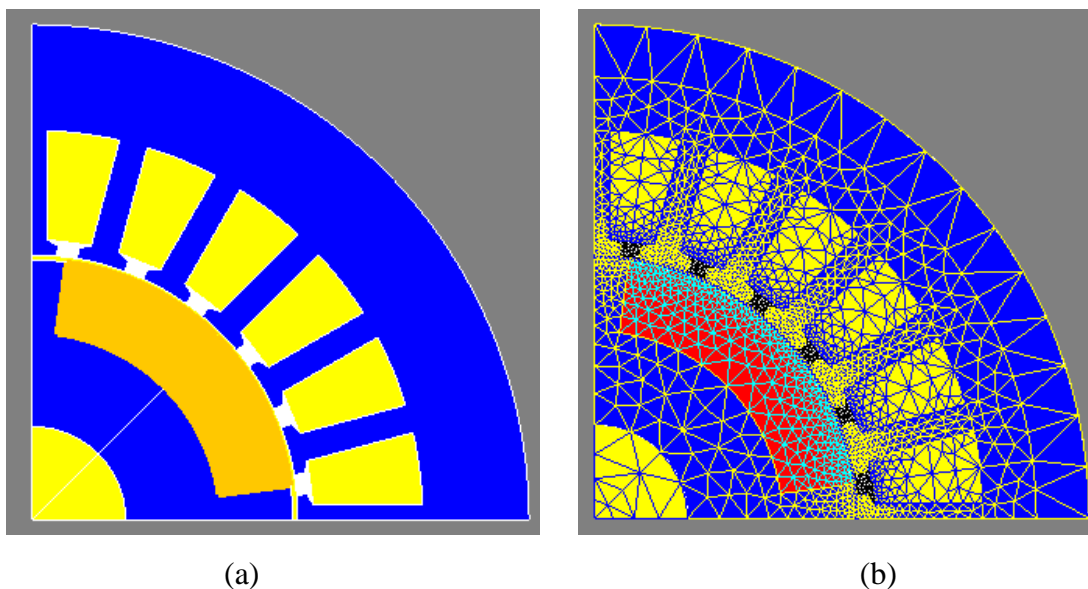


Figure IV.15 (a-b) : Le un quart (1/4) de la géométrie et le maillage triangulaire de la machine étudié

La figure IV. 16 représente la répartition des lignes du flux magnétique dans la machine pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.404T$.

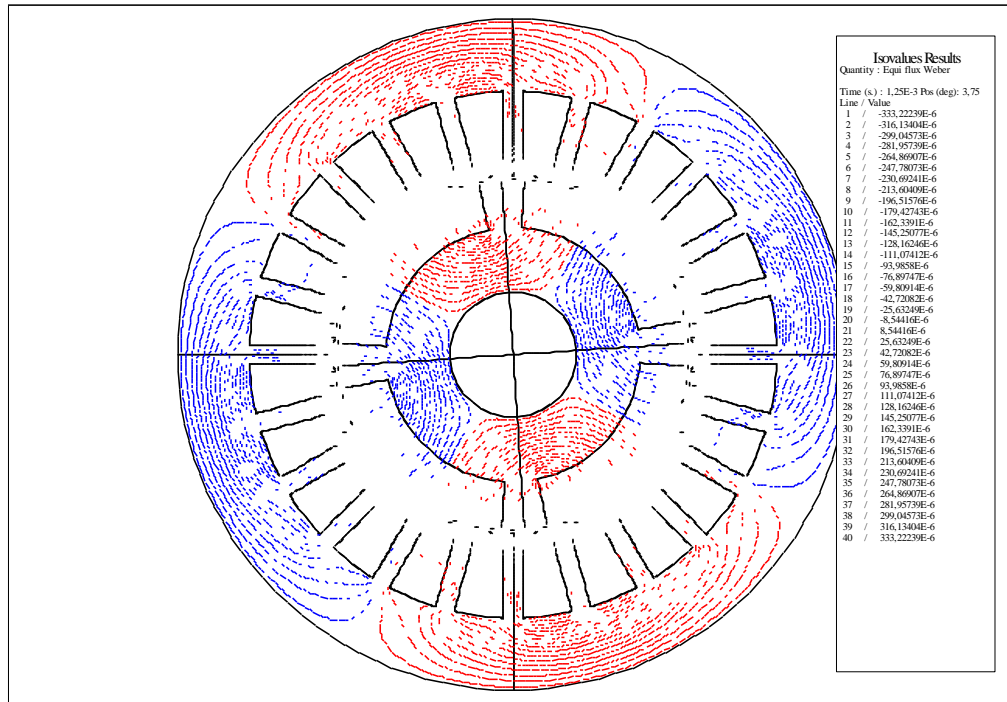


Figure IV.16 : La répartition des lignes du flux magnétique dans la machine.

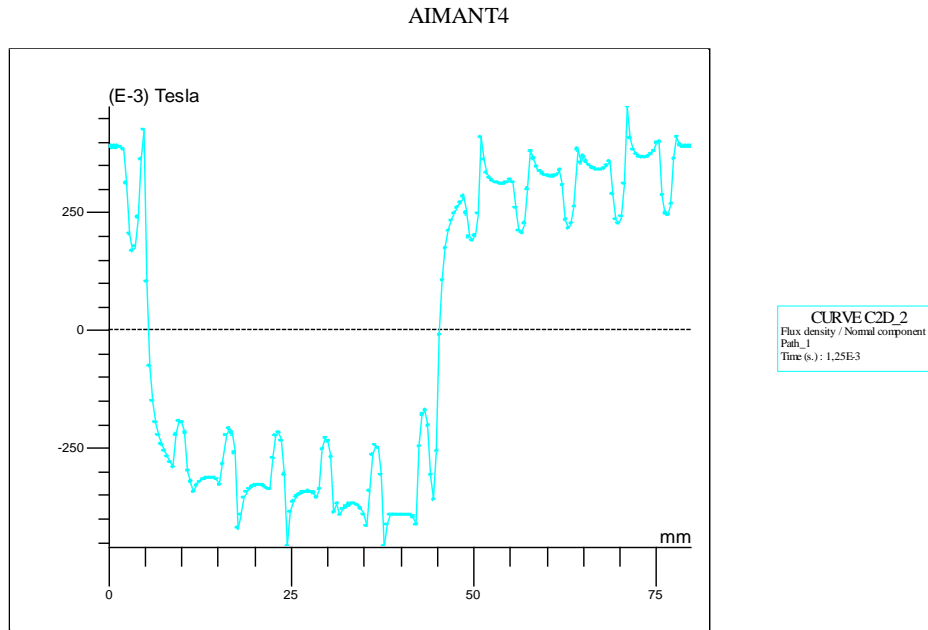
La figure IV.17 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

La figure IV.18 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.

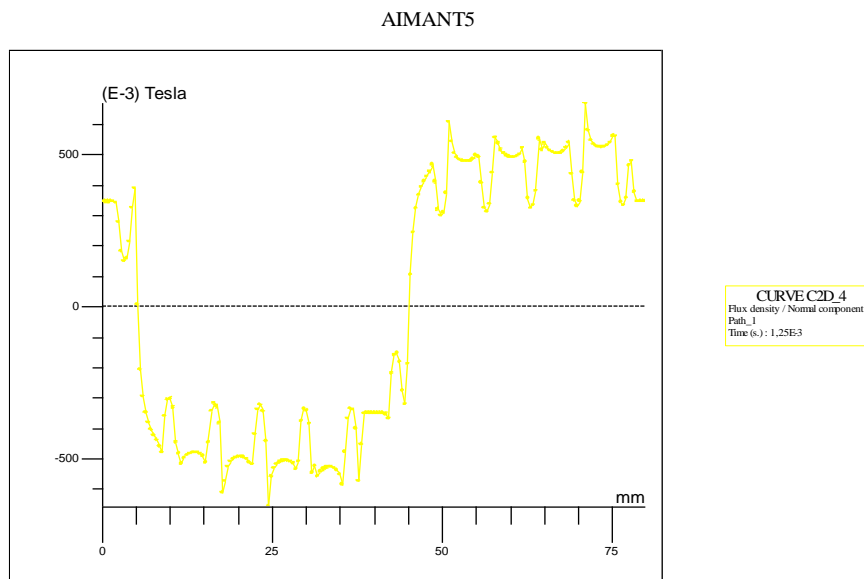
La figure IV. 19 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$.

La figure IV. 20 (a-b) représente respectivement la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

La figure IV. 21 représente la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

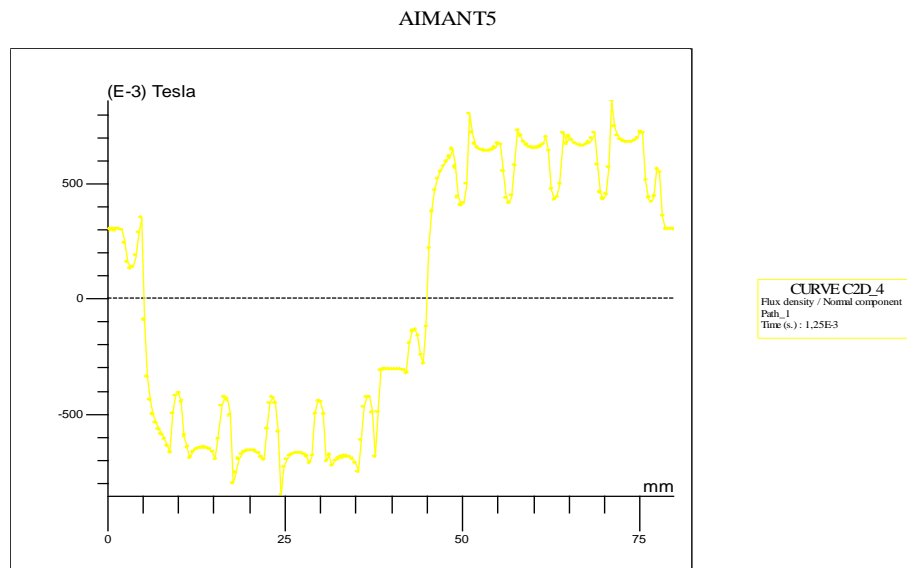


(a)

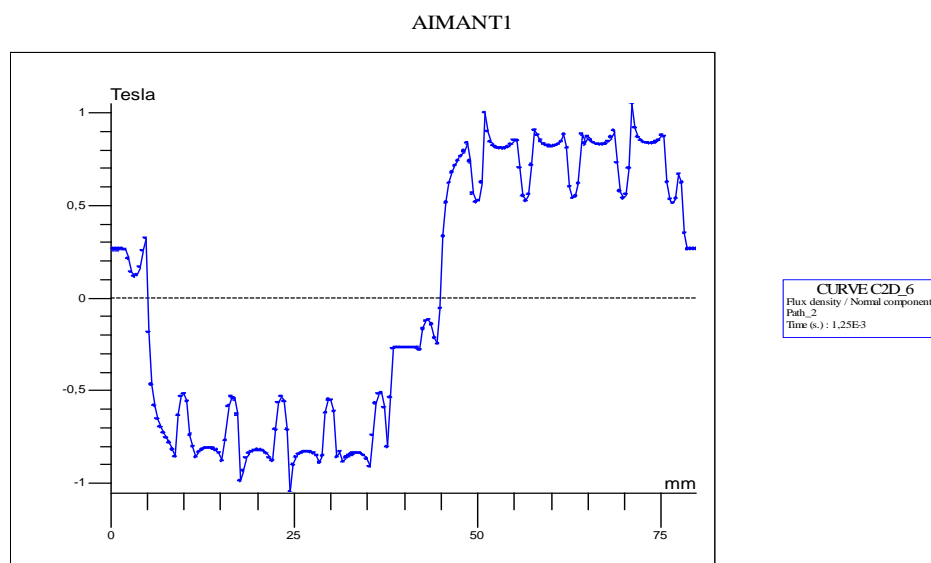


(b)

figure IV.17 (a-b) : la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanant conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

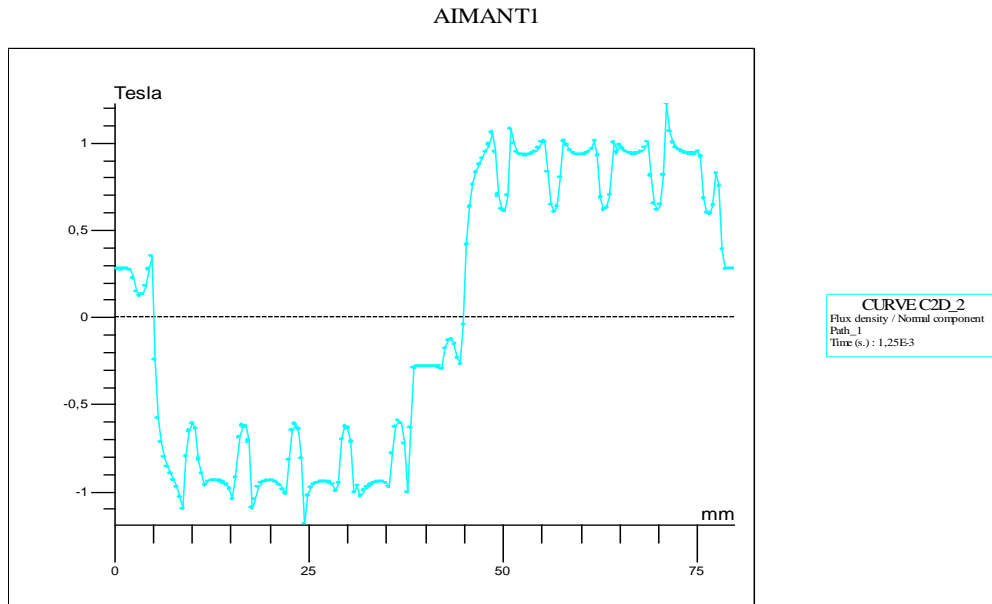


(a)

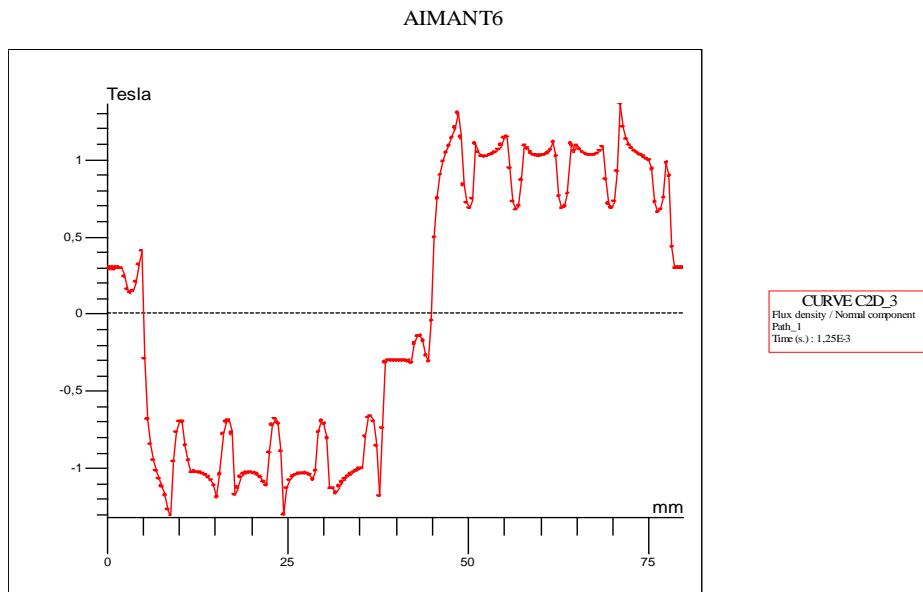


(b)

Figure IV.18 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanant conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.



(a)



(b)

Figure IV. 19 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant permanant conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec

$$B_r = 1.4T.$$

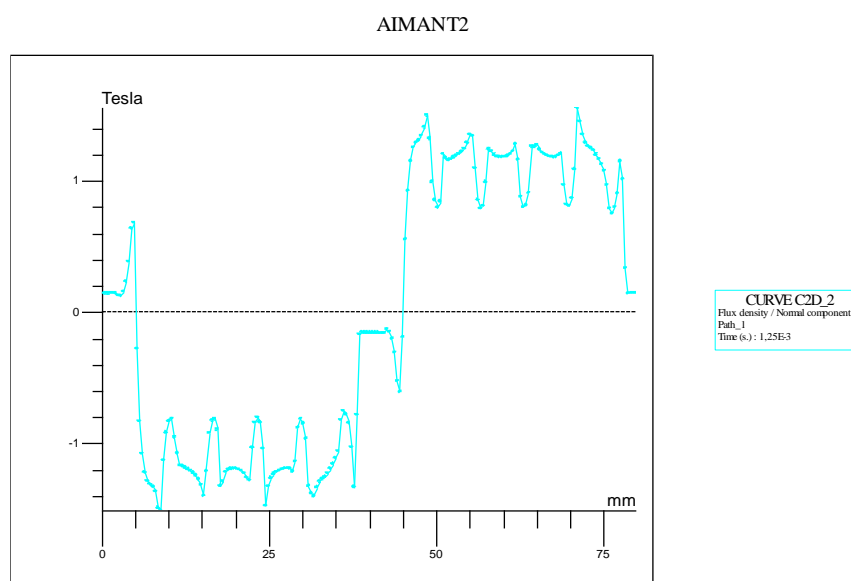
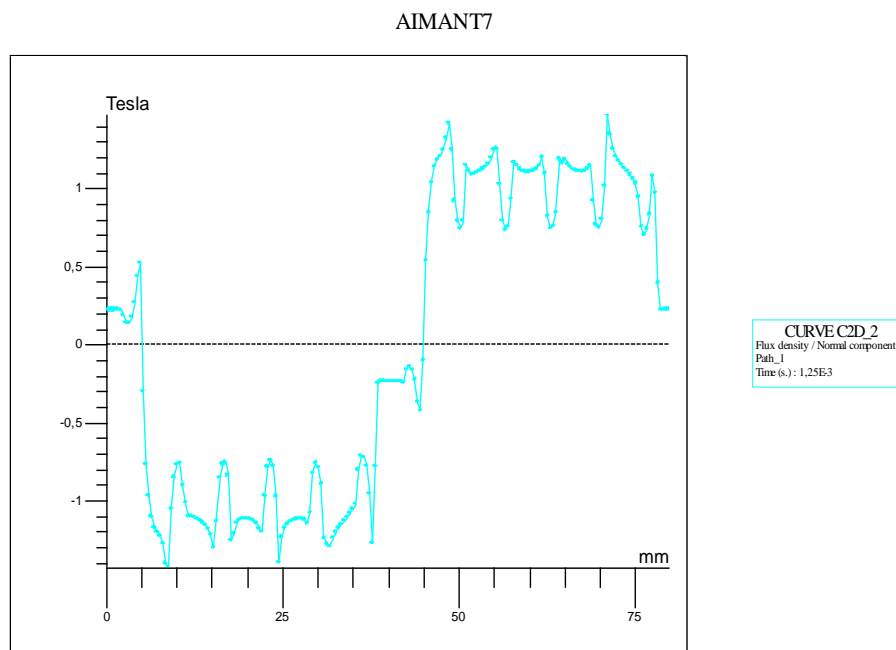


Figure IV. 20 (a-b) : La variation spatiale de l'induction magnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

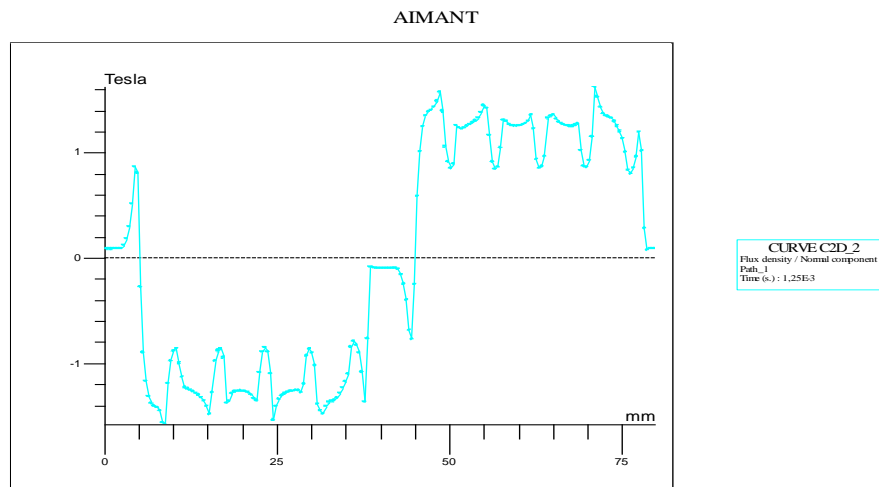


Figure IV. 21 : la variation spatiale de l'induction magnétique obtenue pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

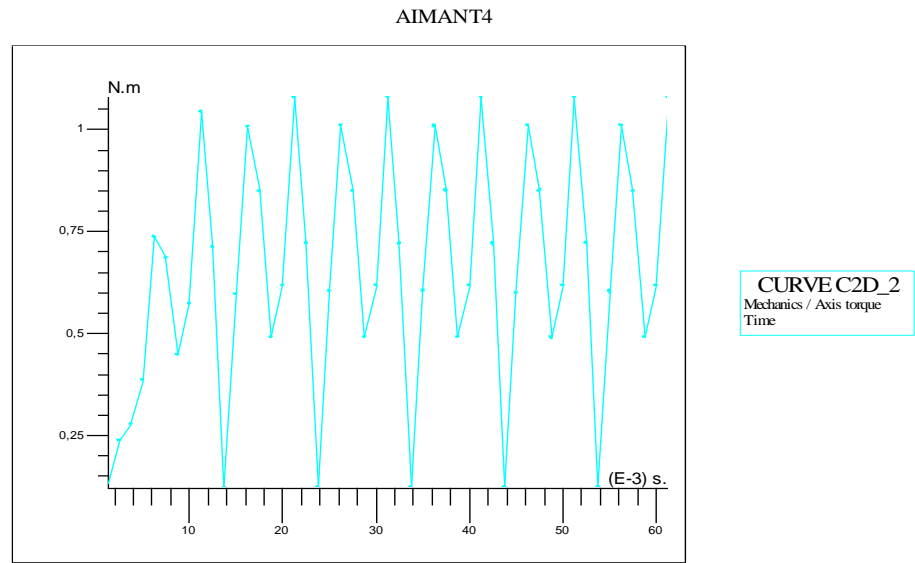
La figure IV. 22 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

La figure IV. 23 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.

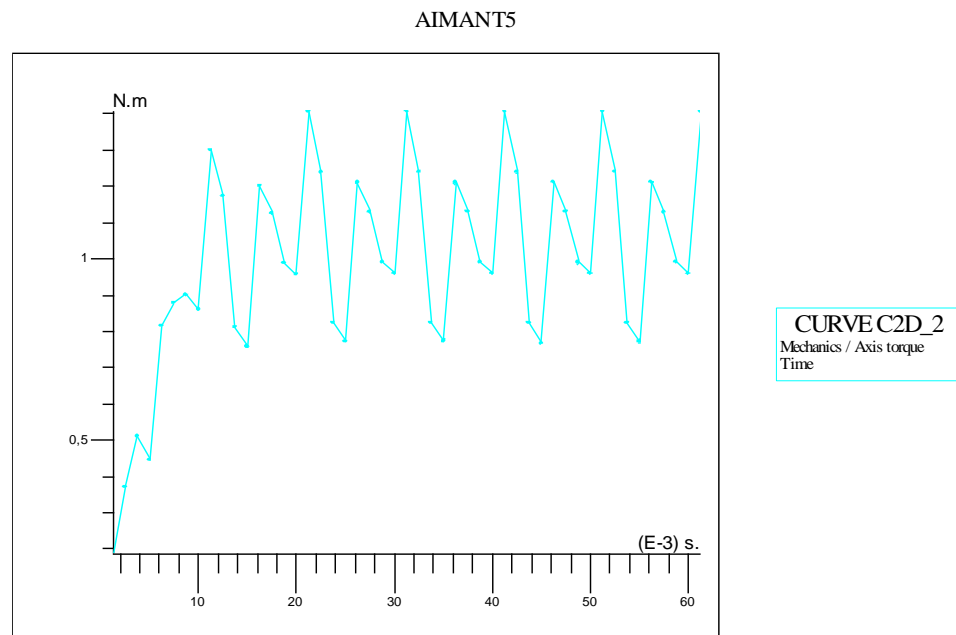
La figure IV. 24 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$.

La figure IV. 25 (a-b) représente respectivement la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

La figure IV. 26 représente la variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

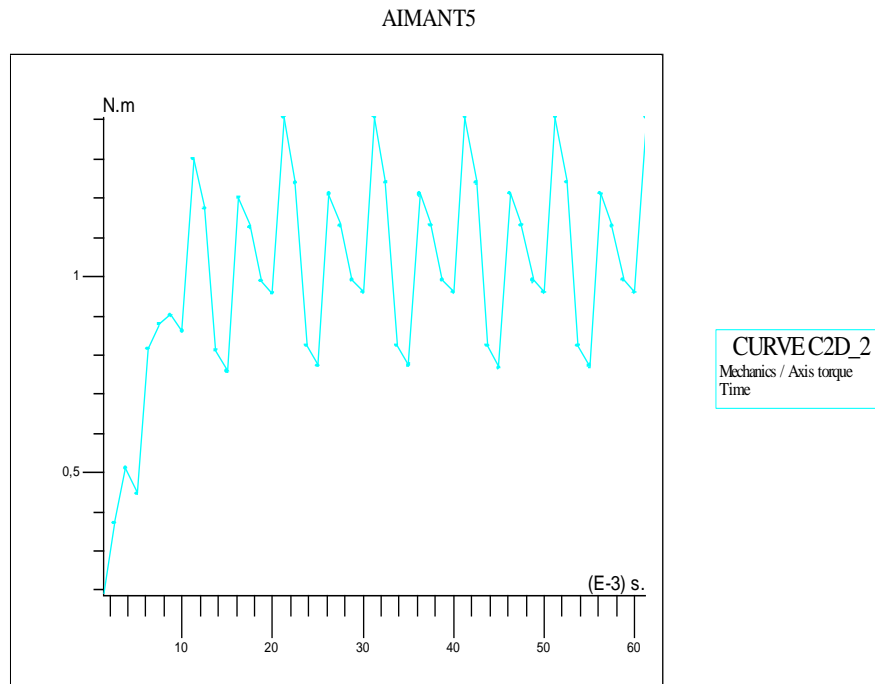


(a)

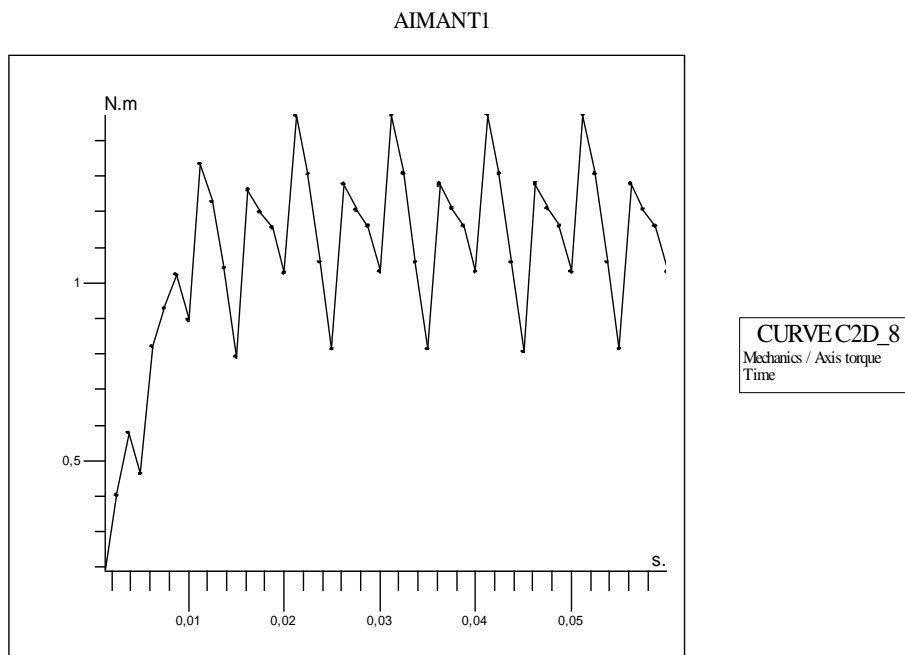


(b)

Figure IV. 22 (a-b) La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.4T$ et $0.6T$.

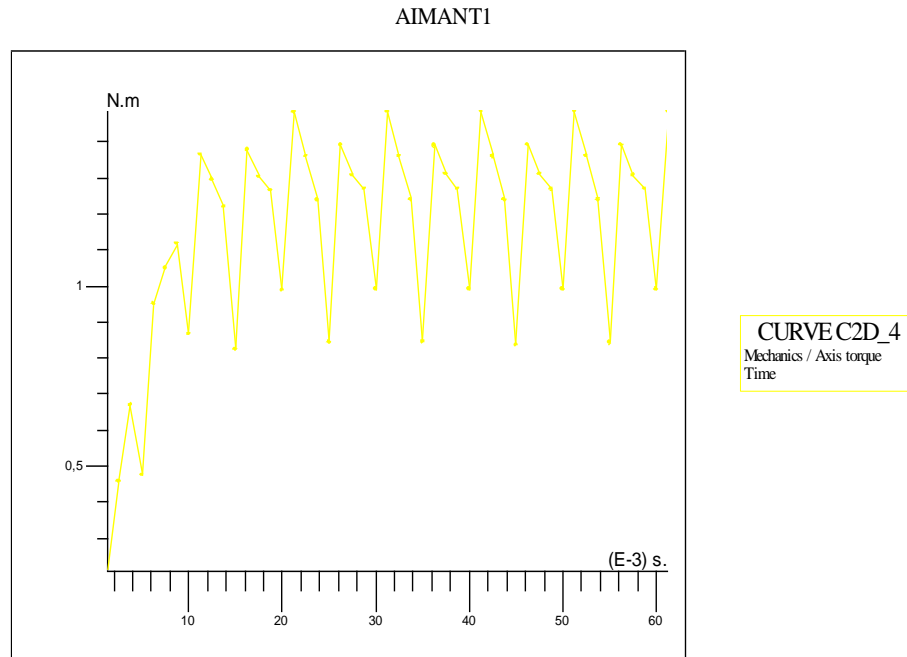


(a)

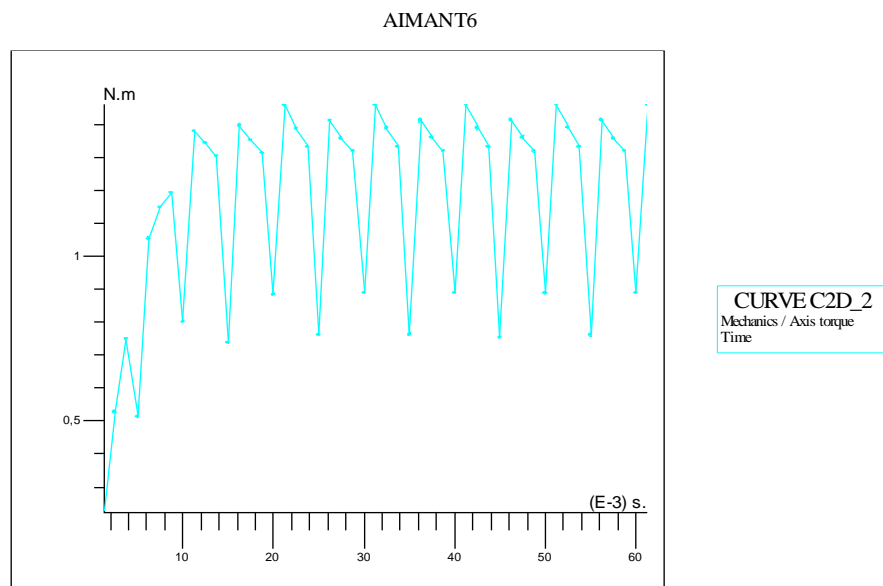


(b)

Figure IV. 23 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 0.8T$ et $1T$.

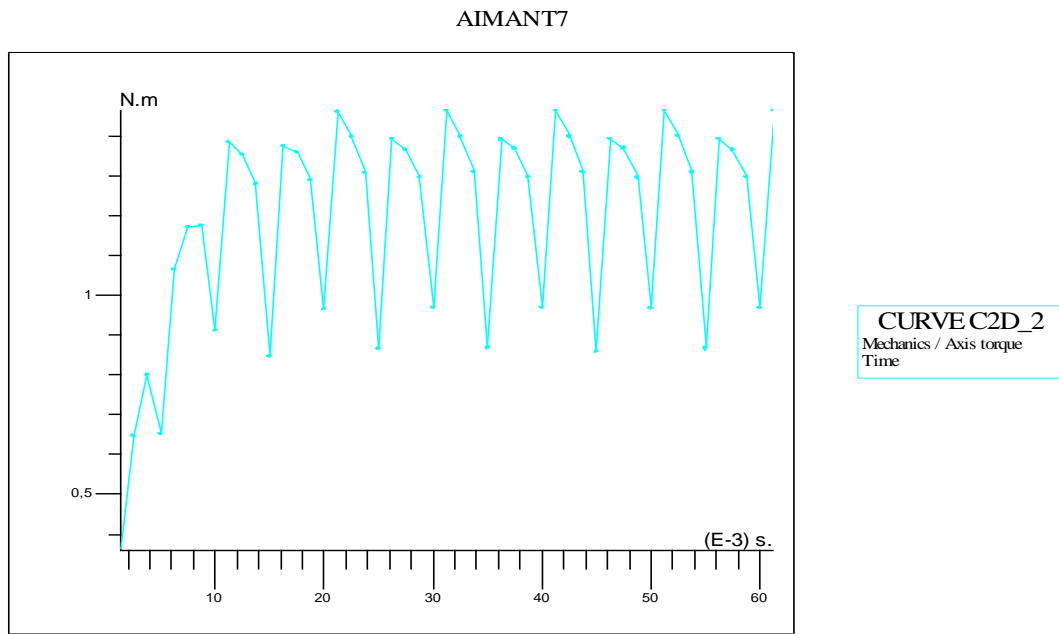


(a)

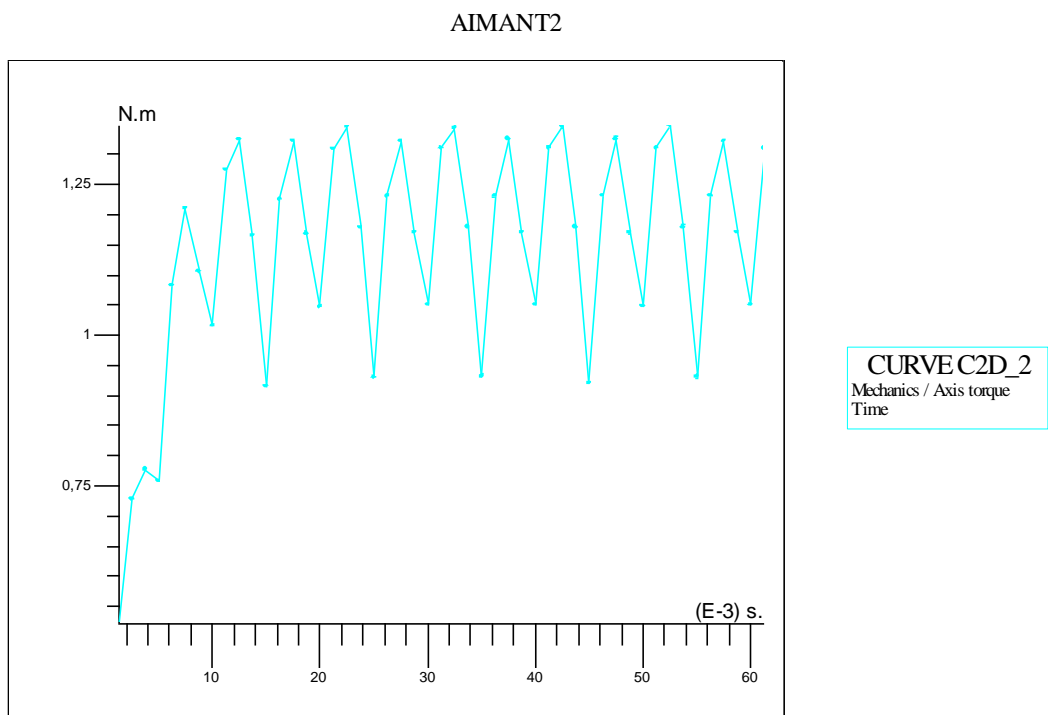


(b)

Figure IV. 24 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$ et un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.4T$.



(a)



(b)

Figure IV. 25 (a-b) : La variation temporelle du couple électromagnétique obtenus pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$ et $1.8T$.

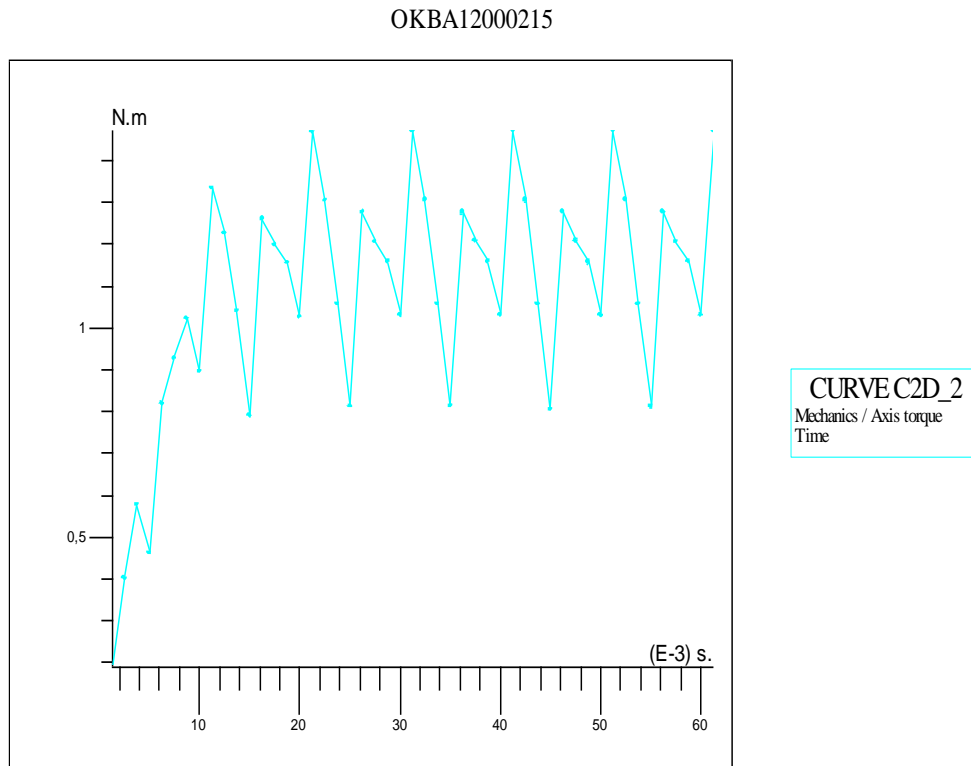


Figure IV. 26 : la variation temporelle du couple électromagnétique obtenu pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$.

IV-3-3 Interprétation

Par la comparaison entre les résultats présentés dans les figures IV. 17, IV. 18, IV. 19, IV. 20 et IV. 21, on peut dire qu'il existe vraiment une différence entre l'induction magnétique au sein de la machine à pôles lisses obtenus par les aimants supraconducteurs avec celle obtenus par les aimants conventionnels. En effet, le maximum de l'induction magnétique à l'intérieur de la machine étudié atteint la valeur de $1.2T$ pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$, alors qu'il atteint la valeur de $1.4T$ pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 1.6T$. Et à partir de cette valeur, l'induction magnétique au sein de la machine prend des valeurs quasiment constantes c'est-à-dire, le circuit magnétique est saturé.

Pour vérifier l'efficacité d'implémenter les aimants supraconducteurs au sein de la machine à pôles saillant, nous avons comparé le couple électromagnétique obtenus pour les deux cas (aimant permanent conventionnelle et aimant supraconducteur). Cette comparaison est présentée dans les figures IV. 22, IV. 23, IV. 24, IV. 25 et IV. 26. On peut dire que l'insertion des aimants supraconducteurs améliore et augmente légèrement le couple

électromagnétique de la machine. En effet, le couple électromagnétique atteint un maximum de $1.4N.m$ pour un aimant permanent conventionnelle avec $B_r = 1.2T$, par contre il atteint un maximum de $1.5N.m$ pour un aimant supraconducteur avec $B_r = 2T$ cela est due à la saturation précoce du circuit magnétique.

Nous remarquons aussi que dans la machine à pôles lisses, l'allure du couple électromagnétique est plus stable par rapport à celle obtenus dans la machine à pôles saillants.

VI.4. Machine avec un matériau supraconducteur

IV-4-1 Description du système

On remplace les aimants dans la machine à pôles lisses présenté précédemment par un type de matériaux supraconducteurs qui trouvé dans la bibliothèque de logiciel Flux-2D. Les caractéristiques de ce matériau sont présentées dans le tableau IV. 2

valeur
$E_c = 10^{-4} \text{ V/m}$
$J_{C0} = 4.4 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$
$B_0 = 21 \cdot 10^{-3} \text{ T}$
$B_0 = 21 \cdot 10^{-3} \text{ T}$
$n_0 = 15$
$B_1 = B_0$
$\rho_0 = 10^{-13} \Omega \cdot m$

Tableaux IV. 2 : Les caractéristiques du matériau supraconducteur utilisé.

La figure IV. 27 et IV 28 représente la répartition des lignes du flux magnétique dans la nouvelle machine à pôles lisses avec matériau supraconducteur et la variation spatiale de l'induction magnétique obtenus dans la machine étudiée.

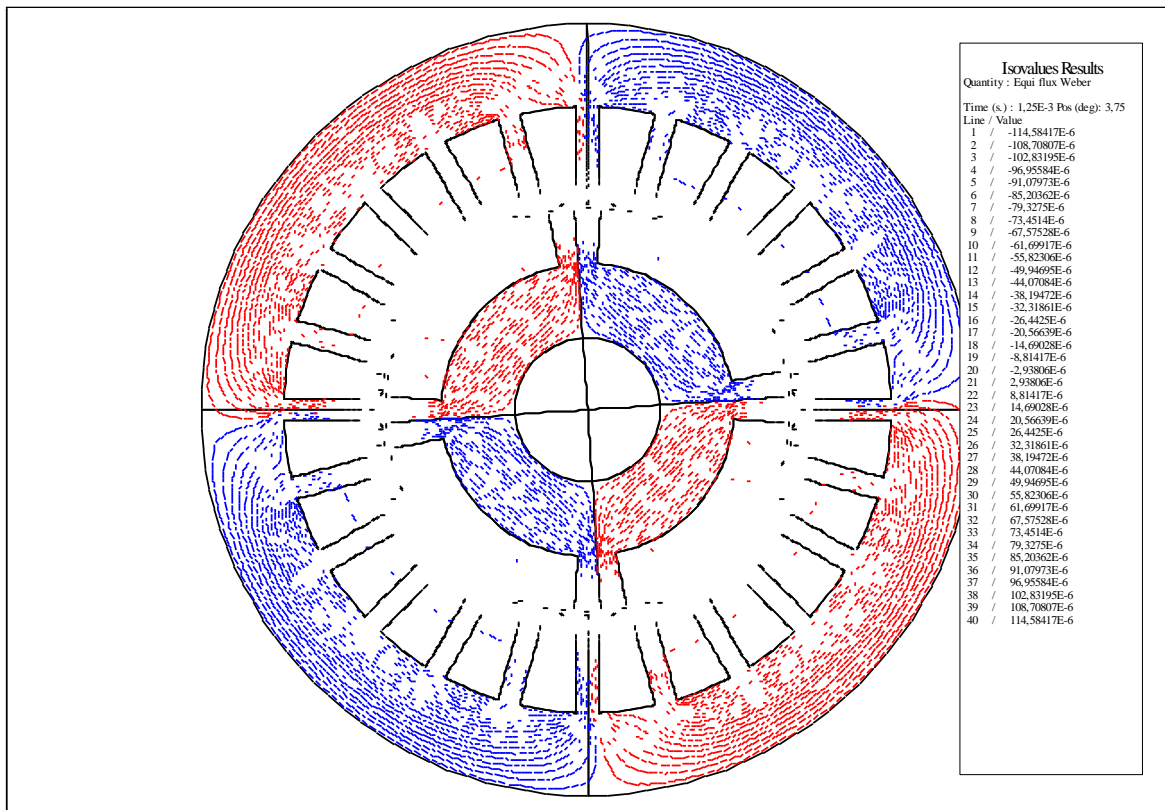


Figure IV.27 : La répartition des lignes du flux magnétique dans la machine étudié.

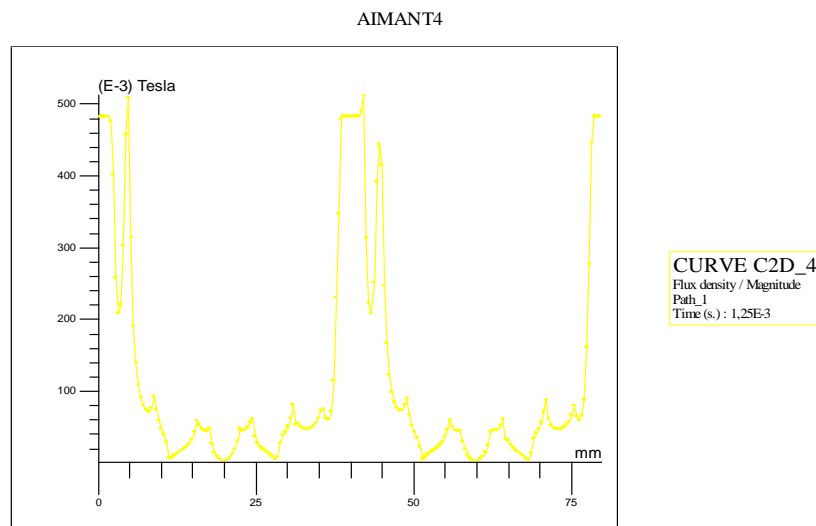


Figure IV.28 : la variation spatiale de l'induction magnétique obtenue dans la machine étudiée.

IV-4-2 Interprétation

D'après cette figure nous remarquons que le matériau supraconducteur expulse les lignes de champ magnétique c'est-à-dire il comporte comme un matériau diamagnétique parfait. Cet effet représente la deuxième propriété fondamentale des matériaux supraconducteurs. Donc on peut dire que l'implémentation de ce type de matériau supraconducteur dans la machine à pôles lisses ne permet pas d'augmenter et d'améliorer l'induction magnétique et par la suite le couple électromagnétique.

VI.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans deux types des machines à aimant, soit à pôles saillant et lisses. Ces résultats sont obtenus par le logiciel Flux-2D qui est basé sur la méthode des éléments finis. Notre résultat de simulation montre que l'insertion des aimants supraconducteurs permet d'augmenter l'induction magnétique et d'améliorer l'allure du couple électromagnétique.

Conclusion générale

Ce travail est un apport important à la modélisation des machines à aimants permanent conventionnelles et à aimants supraconducteur par l'utilisation de logiciel Flux-2D. L'ensemble de notre rapport se situe dans :

- La comparaison entre l'induction magnétique et le couple électromagnétique obtenus par des aimants permanents conventionnelles et des aimants supraconducteur inséré dans une machine à aimant à pôles saillant.
- La comparaison entre l'induction magnétique et le couple électromagnétique obtenus par des aimants permanents conventionnelles et des aimants supraconducteur inséré dans une machine à aimant à pôles lisse.
- Etudier le comportement de la machine à pôles lisse avec l'insertion d'un matériau supraconducteur.

L'induction magnétique dans la machine augmente au fur et à mesure que l'induction rémanente des aimants insérés augmente. L'élévation de l'induction magnétique permet d'améliorer le couple électromagnétique et les performances de la machine. Ces avantages sont aboutir par l'insertion des aimants supraconducteurs dans la machine étudiée, soit à pôles saillants où lisses.

Le phénomène de la saturation de circuit magnétique dans les machines à pôles lisse est plus rapide que dans les machines à pôles saillant, par contre le couple électromagnétique est plus stable dans cette dernière. L'insertion du matériau supraconducteur au lieu de l'aimant permanent dans la machine à pôles lisses permet d'expulser les lignes de champ magnétique, c'est-à-dire le matériau supraconducteur empêche la pénétration de ce champ à l'intérieur (l'effet Meissner où diamagnétisme parfait).

En perspective, et enfin d'obtenir une vision entière sur la modélisation des machines à aimant conventionnelle et supraconducteur, il serait intéressant de :

- Utiliser ce logiciel pour modéliser les autres types des machines supraconductrices,

- Développer un code de calcul basé sur la méthode des volumes fins en bidimensionnelle pour modéliser le comportement magnétique des machines à aimant supraconducteur,
- Modéliser le couplage entre les phénomènes électromagnétiques et thermiques dans les machines supraconductrices.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]– **BEN ALIA KHALED** (étude de la lévitation magnétique entre les aimants permanents et les supraconducteurs) Mémoire de Magister, Université de Biskra. 2009.

[2]- **Philippe MASSON:** (étude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs. Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale.) Mémoire de Doctorat, Université de Nancy, 2002.

[3] -**Boris Bellin:** (CONTRIBUTIONS A L'ETUDE DES BOBINAGES SUPRACOND- -UCTEURS : LE PROJET DGA DU SMES HTS IMPULSIONNEL) Mémoire de doctorat université de Grenoble 2006.

[4]– **Wiest-Million, Nicolas Lemoine, Julien Solt Edouard:** (Les matériaux supraconducteurs), Rapport d'Epistémologie ,2002.

[5]- **Renaud MOULIN** (Dimensionnements et essais de moteurs supraconducteurs) Mémoire de doctorat l'université Henri Poincaré, Nancy-I.

[6]–**C. Berriaud (CEA), P. Tixador (G-INP)** (La Supraconductivité : maintenant et pour l'avenir Applications). 2011.

[7]- **Dr. Driss Yousfi** (ALIMENTATION ET COMMANDE DES MOTEURS DC) Département Génie Electrique 2^{ème} Année Cycle d'Ingénieur Janvier 2007
Première version : 2005.

[8]- Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2004 ISBN : 2-909968-63-4(LES MACHINES SYNCHRONES AUTOPILOTÉES).

[9]-J.P.SABONNADIÈRE, J.L.COULOB, (calcul des champs électromagnétique) , technique de l'ingénieur ,D3020.pp.i-20.

[10]-G.DEVELY ,(chauffage par induction électromagnétique :principes) ,article D5935,vol DAC ,parution 02/2000.

[11]- F.KREITH, (Transmission de la chaleur et thermodynamique), Edition Masson et SIE Editeur, Paris, France 1967.

[12]- S.V. PATANKER, " Numerical heat transfer and fluid flow ", Serie in computational methods in mechanics and thermal sciences.

[13]-KHAN MOHAMED LOTFI (modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les structures à géométries complexes par adaptation de la méthode des volumes finis)

[14]-A. ZORIG (*Identification des Machines Asynchrones en Vue de leur Diagnostic*), mémoire de magister, Université de Setif 2010.

[15]- FLUX 2D (Brushless DC Motor), Exemple de FLUX 2D 2010.