

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique
Université de M'sila

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة



Département de Génie électrique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie électrique

Option : électromécanique

Thème :

**Dimensionnement d'une machine synchrone à aimants
enterrées multicouche**

Proposé et dirigé par :

Dr. Brahim LADHGEM CHIKOUCHE

Présenté par :

Asma ZERROUGA

Année Universitaire : 2019/2020

Résumé

Le travail présenté dans notre mémoire de fin d'études est consacré au dimensionnement d'une machine synchrone à aimant enterrée multicouche. Tout d'abord, une étude bibliographique générale sur la machine synchrone à aimants permanents est présentée. La modélisation électromagnétique présentée est basée sur les équations de champs « équations de Maxwell ». Plusieurs méthodes ont été faites pour ce type de modélisation ; parmi lesquelles on cite la méthode des éléments finis. Le logiciel FEMM est un outil de calcul utilisé pour dimensionner la machine synchrone à aimants enterrés multicouches, dont l'objectif est d'obtenir la distribution des inductions radiale, tangentielle et les différents couples pour chaque couche au centre de l'entrefer.

Abstract

The work presented in this thesis is focused about permanent magnets synchronous machine with multilayer buried magnet. A general bibliography study on the permanent magnets synchronous machine is presented. The electromagnetic modeling is done by respecting the Maxwell's equations. Several methods have been made for this type of modeling such as the finite element methods. FEMM software is used to calculate synchronous machine performances with different layer of magnets. The main objective of this work is to obtain the radial and circumferential flux density distribution and different torques in the middle of airgap.

ملخص

العمل المقدم في أطروحتنا مكرس لأبعاد آلة متزامنة بمغناطيس مدفون متعدد الطبقات. بادئ ذي بدء، قمنا بعمل دراسة بيبليوغرافية عامة على الآلة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم وقدم المغناطيس المدفون كنموذج رئيسي قمنا بدراسته. من الضروري إتباع النمذجة الكهرومغناطيسية، ويجب أن يتم ذلك بواسطة معادلات المجال "معادلة ماكسويل"، وقد تم عمل عدة طرق لهذا النوع من النمذجة بين طرق العناصر المحدودة. أخيرًا، بعد برنامج FEMM أداة الحساب المستخدمة لحجم الآلة المتزامنة بمغناطيس مدفون متعدد الطبقات، والهدف منه هو الحصول على التحريض الشعاعي والماسي وعزم الدوران المختلفة لكل طبقة من الآلة المتزامنة مع مغناطيس مدفون متعدد الطبقات.



Dédicace

A ma très chère mère, puis ma très chère mère, et puis aussi ma très chère mère, symbole sacrifice, que dieu la protège.

A mon père, qui a mis à ma disposition tous les moyens depuis mes études primaire jusqu'à présent, que dieu le protège.

A mon cher frère : MOHAMED EL AMINE.

A mes chères sœurs : NOUR ELHOUDA et SAFA.

A ma meilleure amie : BAHACHE SOUMIA.

A tout le monde que j'aime 

ZERROUGA ASMA.

Remerciements

Avant tout, Je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude.

*Ainsi, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Dr : **LADGHAM CHIKOUCHE BRAHIM** pour avoir proposé ce thème, pour leur suivi, continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et pour leur précieux conseil.*

*Mes remerciements vont aussi s'adresser à mon collègue **BOUDIAF DIAA EDDINE**, pour toute son aide à moi, et pour son soutien moral précieux qui m'a donné du courage à Continuer à travailler dans ce mémoire. Et tous ceux qui ont collaborent de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

*Je remercie aussi tous les enseignants et les responsables du **Département de génie électrique de l'Université de M'sila** pour leur aide et leur encouragement.*

Je finirai avec l'expression de mes remerciements les plus distinguées à mes chers Parents, mon frère et mes sœurs pour leur soutien moral et qui ont cru en moi et m'ont toujours soutenu dans les moments les plus Durs et qui étaient toujours présents dans les moments les plus joyeux.

Merci infiniment.

Sommaire

Résumé

Dédicace

Remerciement

Liste des Figures

Liste des tableaux

Liste des Symboles

Introduction générale1

Chapitre I : Etat de l'art de la machine synchrone à aimants permanents

I.1.Introduction3

I.2. Description de la MSAP.....4

 I.2.1 Le stator5

 I.2.1 Le rotor5

I.3.Différents structures de machines synchrones à aimant permanent.....6

 I.3.1. Structures à flux radial (RFPM).....7

 I.3.2. Structures à aimants déposés en surface.....7

 I.3.3. Structures à aimants encastrés8

 I.3.4. Structures à aimants enterrés.....9

 I.3.5. Structures à flux axial (AFPM)9

I.4 principe de fonctionnement de la MSAP..... 11

 a. Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)12

 b. Fonctionnement en mode Moteur (MSAP).....12

I.5. Les avantages des machines synchrones à aimants permanent12

I.6.Les Inconvénients du moteur synchrone à aimant permanent13

I.7. Alimentation de la machine à aimant permanent.....13

 I.7.1. Moteur à f-é-m trapézoïdale14

 I.7.2. Moteur à f-é-m sinusoïdale14

I.8. domaine d'application14

I.8. Structure statorique.....15

I.8.1. Représentation des enroulements	16
a. Bobine concentrique reliées en série.....	17
b. Bobine identique ou section reliées en série.....	17
I.8.2. Type de bobinage :	17
I.9. Principaux matériaux utilisés dans les machines électriques.....	18
I.10. les aimants permanents.....	18
I.10.1. Aperçu sur son historique.....	18
I.10.2. Définition et représentation des aimants permanents	19
I.10.3. Le magnétisme des aimants	19
I.10.4. Les structures des aimants permanents	19
I.10.5. Propriétés d'aimants permanents.....	20
I.10.6. Les différents types des aimants permanents.....	21
I.10.6.1. Les aimants métalliques	22
I.10.6.2. Les ferrites	22
I.10.6.3. Terre rares.....	22
I.10.6.4. Samarium Cobalt (SmCo).....	22
I.10.6.5. Néodyme-Fer-Bore.....	23
I.10.7. Origines des pertes dans les aimants.....	27
I.10.8. Stabilité des aimants.....	27
I.11. Machine à aimants enterrées	28
I.10. Conclusion	30
 Chapitre II : Modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents	
II.1. Introduction.....	32
II.2. Description 2D du champ électromagnétique dans les machines électriques	32
II.3. Modélisation des machines synchrones.....	33
II.3.1. La méthode analytique	33
II.3.1.1. Les équations de Maxwell.....	34
II.3.2. La méthode semi-analytique	37
II.3.2.1. La méthode de transformation conforme.....	37
II.3.2.2. La méthode réseaux de réductances	38
II.3.2. Les méthodes numériques	39

Sommaire

a) Méthode des différences finies (MDF) :.....	39
b) Méthode des Volumes Finis (MVF) :.....	39
c) La méthode des intégrales des frontières (MIF):.....	40
d) Méthode des Eléments Finis (MEF) :.....	40
II.4. La méthode des éléments finis	40
II.4.1. Présentation la méthode des éléments finis.....	40
II.4.2. Analyse des éléments finis	40
II.4.3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis	42
II.5. Présentation de l’outil de calcul utilisé	42
II.6. Description du logiciel FEMM	43
II.6.1. Introduction.....	43
II.6.2. Présentation de logiciel FEMM.....	44
❖ Le pré processeur.....	44
❖ Le Solver.....	44
❖ Le Post-processeur	44
Chapitre III : Dimensionnement d’une machine synchrone à aimants enterrés multicouche.	
III.1. Introduction.....	48
III.2. Présentation de la structure de machine étudiée	48
III.2.1. Paramètres de la machine.....	50
III.3. Structure de la machine étudiée des différentes couches.....	50
III.3.1. Première couche	50
III.3.2. Deuxième couche	51
III.3.2. Troisième couche.....	52
III.4. Résultats de simulations.....	54
III.4.1. Induction radiale	54
III.4.2. Induction tangentiel.....	55
III.4.3. Couple de détente	57
III.5. Conclusion	61
Conclusion générale.....	59

Sommaire

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art de la machine synchrone à aimants permanents

Figure I.1 : Evolution des prix du Néodyme et du Samarium sur une décennie.....	3
Figure I.2 :Contexte géopolitique autour des terres rares.....	4
Figure I.3 : Machine synchrone a aimant permanent.....	4
Figure I.4 : Le stator d'une machine synchrone à aimant permanent.....	5
Figure I.5 : Forme simplifiées de la machine synchrone à rotor bobine.....	6
Figure I.6 :Vue schématique des machine : a) a flux radial, b) a flux axial.....	6
Figure I.7 : Topologies simplifiées du moteur MSAP : a) rotor externe, b) rotor interne.....	7
Figure I.8 : Structure à aimant déposé en surface (rotor interne).....	8
Figure I.9 : Structure à aimant encastrés.....	8
Figure I.10 : Structure a aimant enterrés : a) avec concentration de flux, b) structure classique....	9
Figure I.11 : Rotor synchrone a aimant enterrée.....	9
Figure I.12 :Structure axial simple avec un rotor er un stator.....	10
Figure I.13 : Structure à flux axial avec double rotor et un stator.....	10
Figure I.14 : Structure à aimantation axial avec double stator et un rotor.....	11
Figure I.15 : Caractéristique du couple-angle électrique.....	11
Figure I.16 : Classification des machines en termes de rondement, puissance massique, cout et commande.....	13
Figure I.17 : Principales applications des machines synchrone a aimant permanent.....	15
Figure I.18 : Différents type de bobinage : a) une couche, b) double couche.....	18
Figure I.19 : aimant permanent.....	19

Liste des figures

Figure I.20 : Moments non orientés au hasard des nano cristallites enchevêtrés d'un aimant isotrope.....	20
Figure I.21 : Cristallites d'un aimant orienté et moments magnétiques orientés selon Z phase magnétique dure (blanc) et phase non magnétique (grisé).....	20
Figure I.22 : Courbe de désaimantation des aimants.....	21
Figure I.23 : Quelques images des différents types d'aimants permanents.....	24
Figure I.24 : Courbe de désaimantation des principaux types d'aimants.....	24
Figure I.25 : Mode de refroidissement des machines tournantes.....	26
Figure I.26 : Evolution et perspective de la densité énergétique des aimants permanents.....	26
Figure I.27 : Moteur IPM.....	28
Figure I.28 : Coupe transversale du rotor unipolaire d'un départ de ligne à quatre pôles, moteur synchrone à aimant enterré.....	29
Figure I.29 : Structure IPMSM de type enterrée.....	29
Figure I.30 : Coupes transversales : a) rotor externe conventionnel, b) et c) double face machine à reluctance synchrone à double rotor stator	30
Figure I.31 : Coupe transversale du rotor sans âme.....	30

Chapitre II : Modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents.

Figure II.1 : front de Pareto des modèles utilisés pour la conception des machines électriques...33	33
Figure II.2 : représentation de l'ouverture de l'encoche dans le plan S.....	38
Figure II.3 : principales étapes de la transformation conforme.....	38
Figure II.4 : triangles du Massachusetts.....	41
Figure II.5 : coupe transversale de la machine avec maillage global en 2D.....	41
Figure II.6 : maillage par éléments finis d'un pas polaire.....	42
Figure II.7 : circuits électriques pour la simulation.....	43
Figure II.8 : programme FEMM.....	43
Figure II.9 : barre de menu principale.....	43

Chapitre III : Dimensionnement d'une machine synchrone à aimant enterrés multicouche.

Figure III.1 : la structure de la machine étudiée.....	49
Figure III.2 : représentation de l'enroulement statorique.....	49
Figure III.3 : structure d'une machine à une couche d'aimant.....	50
Figure III.4 : ligne de champ d'une a une couche d'aimant.....	51
Figure III.5 : structure d'une machine à deux couches d'aimant.....	51
Figure III.6 : ligne de champ d'une a deux couches d'aimant.....	52
Figure III.7 : structure d'une machine à trois couches d'aimant.....	52
Figure III.8 : ligne de champ d'une a trois couches d'aimant.....	53
Figure III.9 : induction radiale d'une couche d'aimant.....	53
Figure III.10 : induction radiale de deux couches d'aimant.....	54
Figure III.11 : induction radiale de trois couches d'aimant.....	54
Figure III.12 : induction tangentielle d'une couche d'aimant.....	55
Figure III.13 : induction tangentielle de deux couches d'aimant.....	55
Figure III.14 : induction tangentielle de trois couche d'aimant.....	56
Figure III.15 : couple de détente d'une couche d'aimant.....	56
Figure III.16 : couple de détente de deux couches d'aimant.....	57
Figure III.17 : couple de détente de trois couches d'aimant.....	57

Liste des tableaux

Chapitre I : Etat de l'art de la machine synchrone à aimants permanents

Tableau I.1 : Température maximale admissible en fonction de la classe d'isolation.....16

Tableau I.2 : Exemple de propriétés magnétique des aimants.....25

Chapitre III : Dimensionnement d'une machine synchrone à aimants enterrés multicouche.

Tableau III.1 : paramètre de la machine étudiée.....50

Liste des symboles

(EDP): les équations différentielles aux dérivées partielles.

(MSAP): Machines synchrones à aimants permanents.

(GSAP): générateur synchrone à aimant permanent.

(PMSM): Permanent Magnet Synchronous Motors.

(ALINCO): alliage Fer-Aluminium Nickel Cobalt.

(MSRB): Les machines synchrones à rotor bobiné.

(RFPM): Radial flux permanent magnet machine.

(AFPM): Axial flux permanent magnet machine.

(CAO): la Conception Assistée par Ordinateur.

(MSR): Les machines synchrones à réluctance.

(FEMM): Finite Element Method Magnetics.

(MIF): méthode des intégrales des frontières.

(BDCM): Brushless Direct Current Motors.

(MDF): méthode des différences finies.

(MVF): Méthode des Volumes Finis.

(MEF): méthode des Éléments Finis.

(IPM): inside permanent magnet.

(NdFeB): Néodyme-Fer-Bore.

(MPP): Moteurs Pas à Pas.

(SmCo): Samarium Cobalt.

\vec{u} : Vecteurs vitesse des pièces conductrices susceptible de se déplacer [m/s].

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m²].

Liste des Symboles

\vec{J}_D : Vecteur densité du courant électrique de déplacement [A/m^2].

\vec{J}_C : Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m^2].

\vec{J}_{ex} : Densité des courants d'excitation (source) [A/m^2].

ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m^3].

ω_r : La vitesse de rotation de la machine (rad/s).

ω : La pulsation des courants statoriques (rad/s).

p : Le nombre de paire de pôles de la machine.

q : nombre d'encoche par pole et par phase.

\vec{H} : Vecteur champs magnétique [A/m].

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T].

\vec{E} : Vecteur champ électrique [v/m].

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

σ : Conductivité électrique [s/m].

ϵ : Permittivité électrique [F/m].

V : relativité magnétique [m/H].

R_1 : Rayon extérieur du stator.

R_2 : Rayon intérieur du stator.

R_3 : Rayon extérieur du rotor.

R_4 : Rayon intérieur du rotor.

P : nombre de paires de pole.

b_0 : Ouverture de l'encoche.

g : L'épaisseur de l'entrefer.

h_0 : Hauteur de l'encoche.

B_r : Induction rémanente.

Liste des Symboles

Q_s : Nombre d'encoche.

H_c : Le champ coercitif.

Z : nombre d'encoche.

N_s : Nombre de spire.

m : nombre de phase.

$2p$: nombre de pole.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les principes physiques de conversion électromécanique de l'énergie dans le champ électromagnétique, et les concepts de machines opérationnelles qui en découlent, sont établis depuis plus d'un siècle. Pourtant, depuis l'avènement du collecteur électromécanique bientôt supplanté par le commutateur électronique, le domaine des machines et actionneurs électromécaniques a connu au cours des dernières décennies un progrès technologique régulier, ouvrant la voie à l'ère du « tout électrique ». Sous la poussée de domaines d'applications tels que l'aéronautique, l'espace ou le secteur de l'armement, cette course technologique semble vivre aujourd'hui une accélération significative visant d'une part, à la recherche de nouvelles fonctionnalités (actionneurs électromécaniques, électromécanismes à haute intégration fonctionnelle...) et d'autre part à l'augmentation des performances (rendement de conversion, effort, puissance massique, couple volumique...).

Les machines électriques qui semblent présenter actuellement les meilleures performances sont les machines synchrones à aimants permanents. Les moteurs à aimants permanents ont une puissance massique et une densité de couple beaucoup plus importantes que les moteurs classiques. Ces caractéristiques sont très importantes pour des applications demandant des variations de vitesse, car il est possible d'obtenir celles-ci plus facilement, sans pertes énergétiques importantes. Pour cette raison, les moteurs à aimants permanents constituent une voie de recherche technique privilégiée pour la motorisation des voitures électriques [4].

L'optimisation des dimensions géométriques de la machine ainsi que la prédiction précise de son fonctionnement exige la connaissance de la répartition du champ magnétique dans toutes les régions actives de la machine. Également, le calcul du champ magnétique est le moyen le plus précis pour la détermination des paramètres électromagnétiques des machines en fonctionnement non linéaire. Pour cette raison, il est indispensable d'employer une méthode numérique, capable de fournir une précision élevée dans le calcul du champ avec le moins d'équations possibles, tel que la plus performante est la méthode des éléments finis **MEF**. Pour plusieurs de courants d'excitation et des positions angulaires du rotor, on est amené à calculer le champ magnétique, plusieurs logiciels de modélisation sont basés sur le principe de la méthode des éléments finis tel que le logiciel **FEMM** ; ce logiciel nous permet d'évaluer et d'analyser la répartition du flux dans les différentes parties du circuit magnétique [30].

L'objectif de notre mémoire est d'étudier le dimensionnement d'une machine synchrone à aimant enterrés multicouche.

Au niveau du premier chapitre, on effectue une revue générale sur la machine synchrone à aimants permanents et ses différentes structures, conçues avec différents types des matériaux disponibles. Nous discuterons également leurs avantages de l'élargissement du domaine

Introduction générale

d'utilisation et leurs inconvénients, On définira aussi les machines synchrones à aimants enterrés multicouche.

La modélisation de la machine synchrone est entamée, dans le deuxième chapitre, aussi en sera consacré à l'étude sur des différentes méthodes de modélisation et on présentera le logiciel de simulation.

Le troisième et le dernier chapitre de notre mémoire sera consacré à une étude sur le dimensionnement d'une machine synchrone à aimants enterrés multicouche. Nous allons représenter les différents résultats de simulation.

Enfin, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus de nos investigations et nous perspectives à ce travail.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART DE LA

MACHINE SYNCHRONE A

AIMANTS PERMANENTS

Chapitre I : Etat de l'art de la machine synchrone à aimants permanents

I.1 Introduction

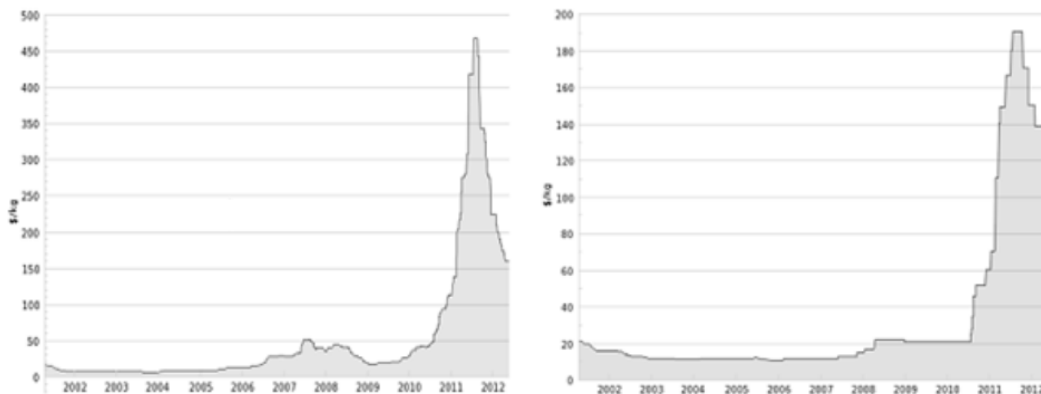
Les machines synchrones jouent un rôle important dans l'industrie. Leur domaine d'emploi consistent à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique ou vice-versa. C'est une machine caractérisée par sa vitesse de rotation synchronisée avec la fréquence du réseau [15]. Cette famille de machine comprend en fait plusieurs sous famille :

- ❖ La machine synchrone a rotor bobiné (MSRB).
- ❖ Les machines synchrones à reluctance (MSR).
- ❖ Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP).

Nous sommes particulièrement intéressés par cette dernière catégorie.

Une machine synchrone à aimants permanents est actuellement le moteur à succès dans un monde industriel où les exigences sont toujours plus élevées. L'amélioration sensible des performances des aimants modernes a été un des facteurs majeurs de ce succès dans les moteurs servomécanismes haute performances. Elle est donc essentiellement développée depuis l'introduction de nouveaux aimants NdFeB (Figure I.1).

Les machines synchrones peuvent être des machines à aimants permanents (MSAP), des Brushless **DC** Machines (BDCM) ou des Moteurs Pas à Pas (MPP). On peut les différencier en fonction de la forme des courants traversant le bobinage statorique qui peut être sinusoïdale ou non-sinusoïdale [20].



a) Cours du Néodyme.

(b) Cours du Samarium.

Figure I.1 : Evolution des prix du Néodyme et du Samarium sur une décennie.

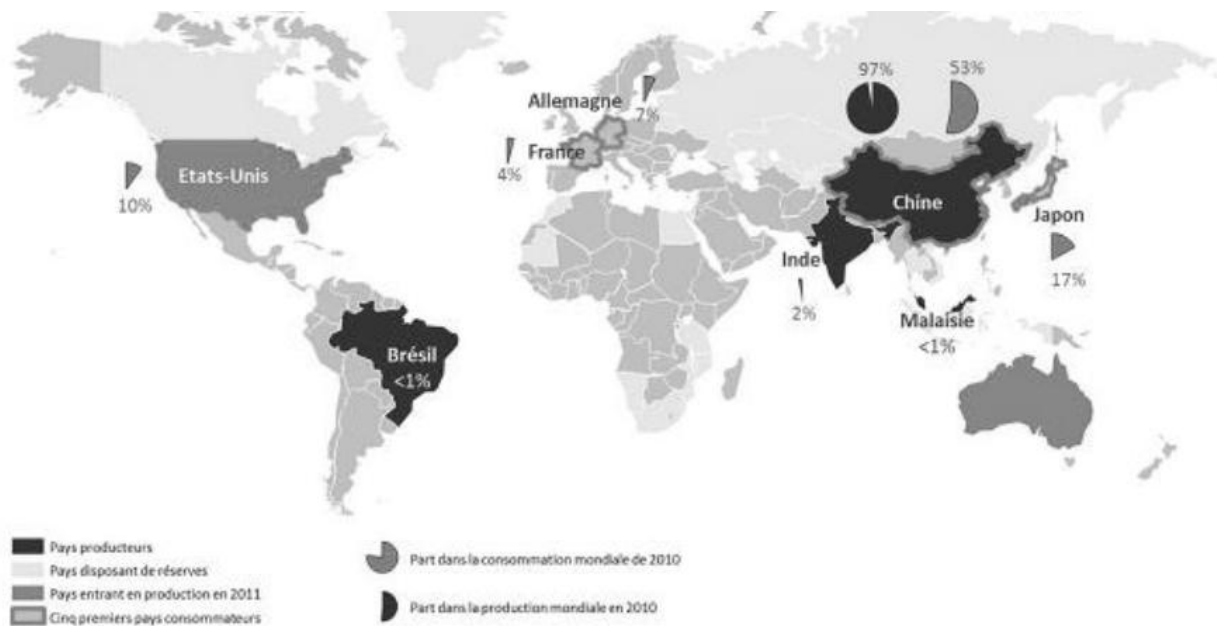


Figure I.2 : Contexte géopolitique autour des terres rares [20].

I.2 Description de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est la structure la plus exploitée malgré une fluctuation importante des prix des aimants permanents, le coût des aimants est un critère très important dans le choix de la motorisation pour les applications de cette machine[7].



Figure I.3 : machine synchrone à aimant permanent.

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique [1], Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, de partie tournante appelée rotor. L'entrefer est l'espace aménagé entre les deux armatures.

I.2.1 le stator

Le stator est le siège du courant d'induit par la variation de flux rotorique. Il est constitué d'une partie active qui porte le bobinage d'induit et il est fixé à la culasse fermée par des flasques [15]. Concernant son fonctionnement, il est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques [1]. On note :

$$\omega_r = \frac{\omega}{p}$$

ω_r : La vitesse de rotation de la machine (rad/s).

ω : La pulsation des courants statoriques (rad/s).

p : Le nombre de paire de pôles de la machine.



Figure I.4 : le stator machine synchrone a aimant permanant.

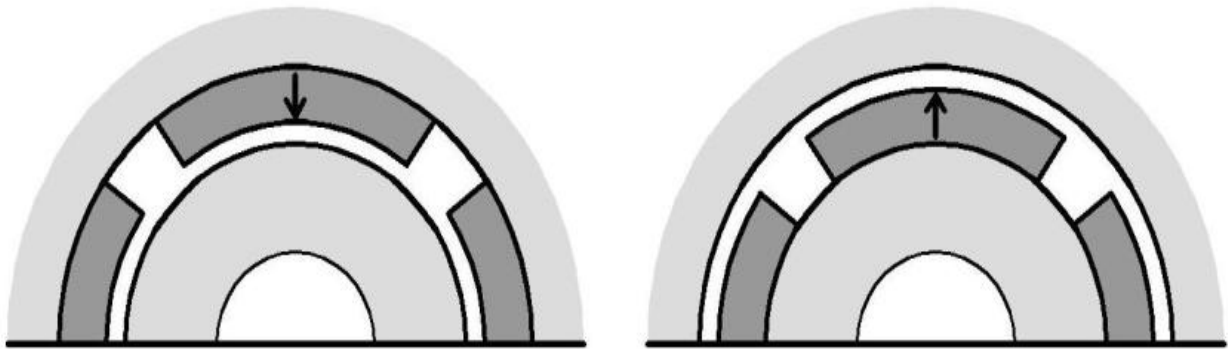
I.2.1 le rotor

C'est un anneau monté sur l'arbre de rotation dont il est solidaire [15], il se compose à des aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [2].

Le rotor de ces machines peut être à pôles lisses (Figure I.5.a), ou à pôles saillants (Figure I.5.b).

I.3.1 Structures à flux radial (RFPM)

Les rotors des machines synchrones peuvent être internes (Figure I.7.b) ou externes (Figure I.7.a). Dans la configuration à flux radial (RFPM), les machines à rotors internes sont des machines classiques. Elles sont faciles à réaliser et possèdent une bonne évacuation des pertes statoriques car le stator se trouve en périphérie. En effet, il y a généralement peu de pertes au rotor du fait de l'utilisation d'aimants permanents. Les machines à rotor externe sont couramment employées en moteur dans le domaine de la traction électrique où on les désigne par le terme de « moteurs roues » (Figure I.7)[20].



(a) (b)

Figure I.7 : Topologies simplifiées du moteur MSAP : **a)** rotor externe, **b)** rotor interne.

I.3.2 Structures à aimants déposés en surface

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses [8].

Les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège les aimants permanents de la désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuges. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur [13].

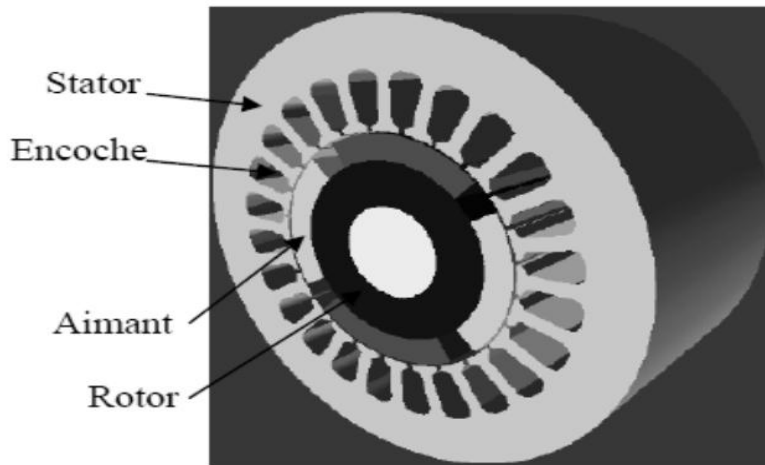


Figure I.8 : Structure à aimant déposé en surface (rotor interne).

I.3.3 Structures à aimants encastrés

Les aimants du type encastrés (insérés) sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la (Figure I.9). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réductants en plus du couple des aimants [2].

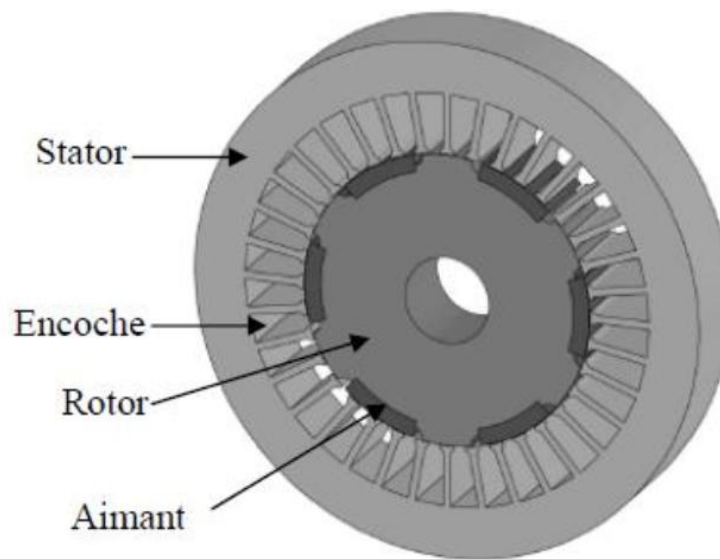


Figure I.9 : Structure à aimant encastrés.

I.3.4 Structures à aimants enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor (Figure I.10) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses [10].

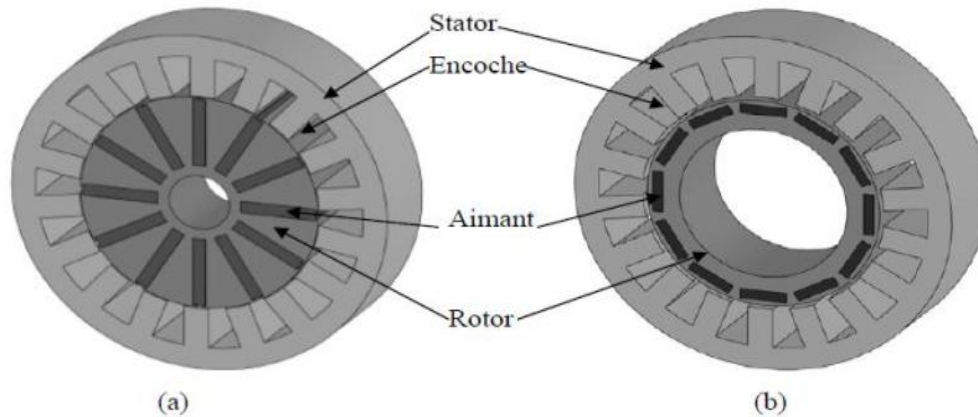


Figure I.10 : Structure à aimant enterrés : **a)** avec concentration de flux, **b)** structure classique.

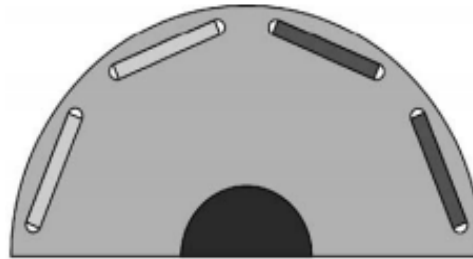


Figure I.11 : Rotor synchrone à aimant enterrée.

I.3.5 Structures à flux axial (AFPM)

Ces machines représentent une autre solution possible pour l'entraînement direct à basse vitesse. Elle comportant un ou plusieurs disques fixes bobines et un plusieurs disques mobiles supportant les aimants permettant. Leurs principaux avantages et l'optimisations de la surface utile de génération du couple. Cependant leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécanique liées aux poussées axiales.

Comparées à structure à flux radial, Ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte. Le flux provenant des aimants est axial tandis que le courant est dans la direction radiale, différentes configurations à flux axial existent : celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure I.12) et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotor (Figure I.13) ou un seul rotor inséré entre deux stator (Figure I.14). L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [18].

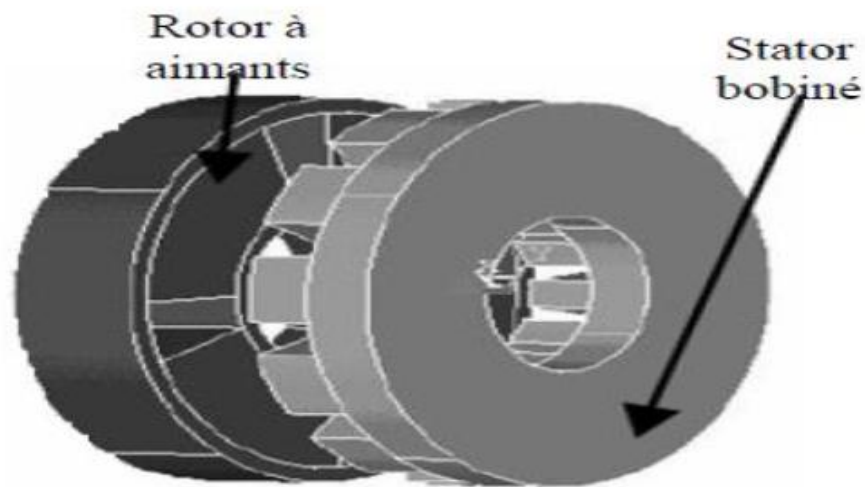


Figure I.12 : structure axiale simple avec un rotor et un stator.

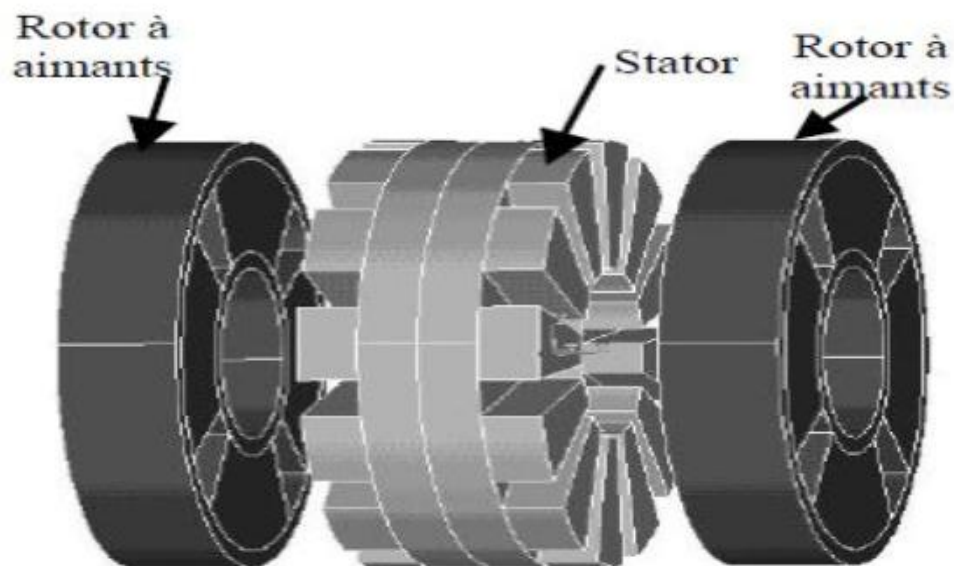


Figure I.13 : structure à flux axial avec double rotor et un stator.

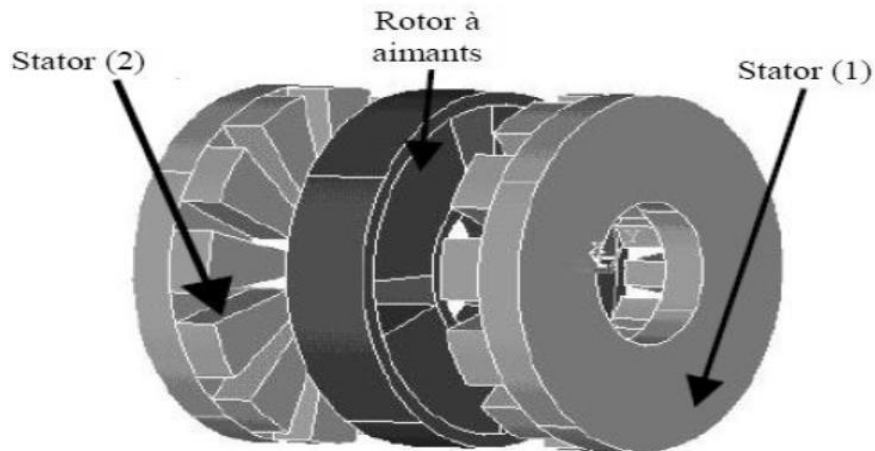


Figure I.14 : structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.

I.4 principe de fonctionnement de la MSAP

Dans le MSAP il existe un stator bobine dont l'alimentation donne naissance à une force magnétomotrice tournant à la vitesse angulaire ω_s . Le rotor, dont le nombre de pôles est égale à celui du stator, est excité par des aimants pour produire une force magnétomotrice d'excitation. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entrainé le rotor. Plus le couple sur l'arbre est élevé plus l'angle de décalage polaire est plus grand.

Le rotor décroché du flux tournant dès que cet angle dépassé 90° . La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator. La caractéristique du couple-angle électrique est illustrée dans la(Figure I.15) [2].

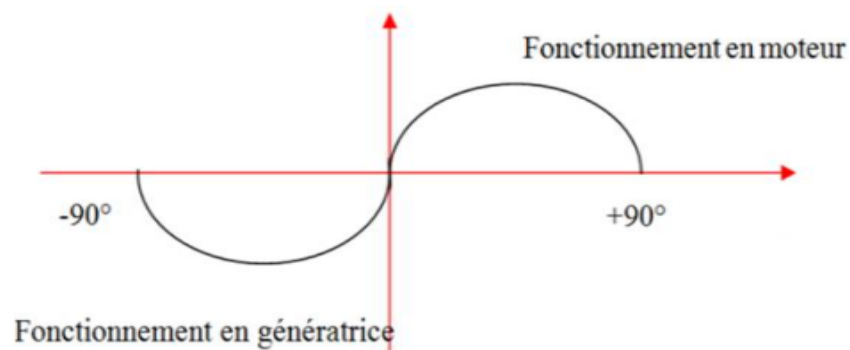


Figure I.15 : Caractéristique du couple-angle électrique.

La machine synchrone à aimant permanent est une machine réversible, elle peut fonctionner en mode génératrice et mode moteur [10].

a. Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW. L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les forces-électro-motrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur [10].

b. Fonctionnement en mode Moteur (MSAP)

Parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements, le moteur synchrone à aimants permanents reste un bon candidat. Son choix devient attractif et concurrent à celui des moteurs asynchrones grâce à l'évolution des aimants permanents et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance. Il permet donc une conversion électromécanique de l'énergie. Le stator de celui-ci est alimenté par un réseau triphasé. Il produit ainsi un champ tournant qui entraîne le rotor. La vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de synchronisme. Elle est donc directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator [10].

I.5 Les avantages des machines synchrones à aimants permanent

Les MSAP ont été de plus en plus utilisées dans différentes applications en raison de leurs nombreux avantages notamment un haut rendement, une bonne compacité, un couple élevé, de bonnes conditions de transfert thermique et un contrôle relativement simple.

Un avantage évident de l'utilisation des aimants au niveau de la production du flux est la suppression des pertes par effet joule du système inducteur. Un autre avantage de l'excitation par aimants, concerne l'amélioration de la sécurité de fonctionnement certes [14].

Pas d'échauffement au rotor, et absence des pertes joules [1]. La suppression des contacts glissants et des dispositifs complexes à diodes tournantes, onéreux et encombrants. Ce mode d'excitation est d'autant plus envisageable que l'on dispose actuellement d'aimants possédant de bonnes propriétés magnétiques (champ coercitif élevé, perméabilité magnétique voisine de μ_0 et électriques (résistivité élevée).

Les pertes joules et les pertes fer sont localisées au stator, ce qui simplifie le refroidissement de la machine synchrone à aimants permanents comparée à la machine à excitation par du courant continu. Ceci autorise un couple volumique plus élevé à vitesse donnée [31].

La (Figure I.16) présente une comparaison sommaire entre ces technologies en termes de coût, rendement, puissance massique et facilité de commande.

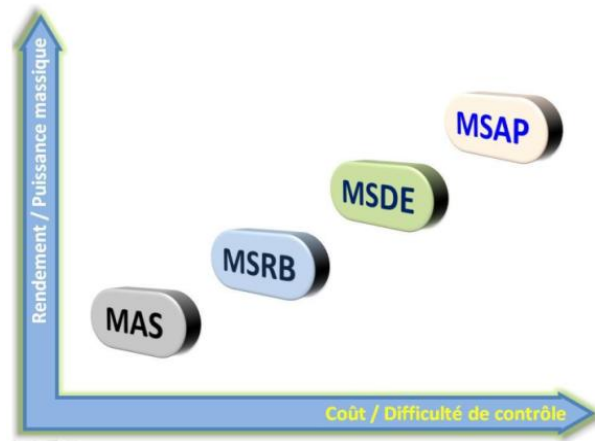


Figure I.16 : Classification des machines en termes de rendement, puissance massique, coût et commande.

I.6 les Inconvénients du moteur synchrone à aimant permanent

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- Il est de conception électrique et mécanique plus complexe.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps [15].
- Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Ondulations de couple [8].
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine [10]. Ces machines sont regroupées en deux grandes familles ; les machines dont la f-é-m est sinusoïdale et des machines dont la f-é-m est trapézoïdale.

I.7 Alimentation de la machine à aimant permanent

Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine. Ces machines sont regroupées en deux grandes familles, les machines dont la f-é-m est sinusoïdale et des machines dont la f-é-m est trapézoïdale.

I.7.1 Moteur à f-é-m trapézoïdale

Pour les machines à f-é-m dite trapézoïdale, la forme du courant la plus appropriée est de type à 120° . Les actionneurs correspondant à ce type d'alimentation sont communément appelés actionneur à courant continu sans balais (BDCM : Brushless Direct Current Motors) ou machines synchrones autopilotées à aimants permanents. Leur commande est simple car leur autopilotage consiste à alimenter à tout instant deux phases et cette commande nécessite uniquement une seule boucle de courant et un capteur de position de faible résolution. Des techniques de minimisation des ondulations de couple sont généralement nécessaires. Les BDCM sont utilisés pour les applications à basse performances (peu sensible au couple) comme les pompes et les ventilateurs [10].

I.7.2 Moteur à f-é-m sinusoïdale

Pour obtenir un couple constant, les courants d'alimentation doivent être également sinusoïdaux, les actionneurs correspondants à cette famille sont appelés actionneurs synchrones (PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motors) Le pilotage du moteur en courants sinusoïdaux permet de supprimer les commutations brutales (source de bruit) et d'obtenir une meilleure régularité du couple moteur. Les PMSM sont utilisé pour les applications à grande performances qui demande une grande qualité de couple [10].

I.8 domaine d'application

Ce type de machines peut convenir pour des applications exigeant une densité de puissance et un rendement élevé (traction, éoliennes, hydroliennes etc.) [20]. Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, telle que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges [18]. Il est utilisé aussi dans Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste), Les servomoteurs, Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements, Les applications robotiques, La production d'électricité, La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins[15], les automobiles.

Le domaine d'emploi de MSAP à l'heure actuelle est de quelques dizaines de Kilowatt à cause des caractéristiques magnétique des aimants qui peuvent être perdu en dépassant les limites de fonctionnement [14].



(a): Les équipements de soins médicaux et de santé



(c): moteur d'un ventilateur et un pompe centrifuge



(b): Compresseur refrigerateur et machine a laver



(d) : automobile

Figure I.17 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents.

I.8 Structure statorique

La structure statorique des moteurs synchrones à aimants permanents généralement ne diffère pas de celle des autres moteurs synchrone et asynchrone classiques. A ce jour, les concepteurs cherchent de retrouver une bonne configuration du bobinage et des encoches les mieux adaptées afin d'atténuer les ondulations et les harmoniques du couple. Le nombre d'encoches statoriques est un paramètre important. En effet, ce choix obéit à des contraintes géométriques, électromagnétiques et mécaniques [4] :

- ❖ Un grand nombre d'encoches statoriques complique la fabrication et la mise en place du bobinage statorique, entraînant l'augmentation du coût de la machine.
- ❖ Pour un système d'enroulements et un nombre de pôles quelconque, le choix approprié du nombre d'encoches statoriques permet d'adopter un pas d'enroulement qui offrirait la possibilité de réduire certains harmoniques de bobinage.

- ❖ Pour un nombre de pôles quelconque, le choix approprié du nombre d'encoches statoriques permet de pousser les pulsations du couple de détente vers de hautes fréquences.

D'un point de vue technologique, le choix de la classe d'isolation du bobinage reste donc un des premiers éléments déterminants de la conception. Les techniques permettant d'améliorer la résistance à la chaleur (classe de température des systèmes isolants (Tableau I.1) ou permettant d'améliorer la conductivité thermique de l'ensemble sont multiples [20].

Tableau I.1 : Température maximale admissible en fonction de la classe d'isolation [20].

Classe d'isolation	Température ambiante 40°C + température d'échauffement					
	A	E	B	F	H	C
Température limite	105°C	115°C	130°C	155°C	180°C	Plus de 180°C

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique, etc.) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Les différentes causes pour ce type de défaut sont[20]:

- ❖ Dégradation de l'isolant et la vibration mécanique.
- ❖ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ❖ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- ❖ Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- ❖ Fonctionnement dans un environnement sévère.

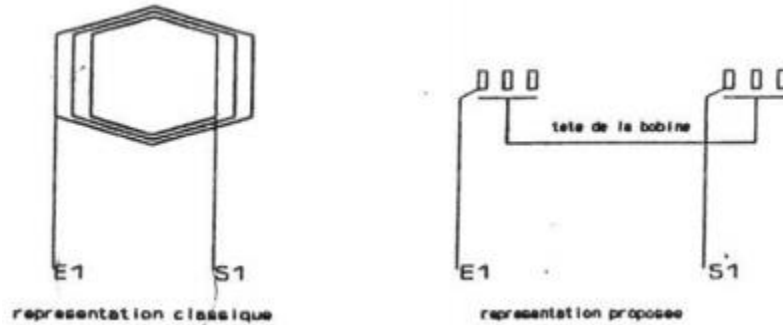
Pour le refroidissement, la méthode la plus performante pour les conducteurs consiste à faire passer un liquide ou un système de pulvérisation d'huile à l'intérieur de ceux-ci. Le refroidissement du stator dans le cas des machines hautes vitesses se fait par de l'air, par de l'eau ou par de l'huile ou avec un liquide spécial. Soulignons qu'en général, la machine encochée dissipe mieux les pertes au niveau du rotor en comparaison avec la machine sans encoches. En effet, la machine encochée bénéficie d'un coefficient thermique meilleur grâce aux dents en fer [20].

I.8.1 Représentation des enroulements

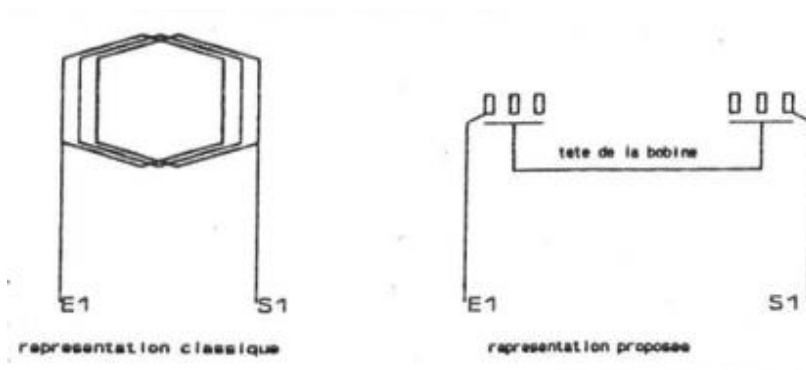
Un enroulement est exécuté dans des encoches présentées sur la surface intérieure du stator. Tous les enroulements électriques sont constitués de groupe de bobine [11].

Le groupe peut être composé de :

a. Bobine concentrique reliées en série



b. Bobine identique ou section reliées en série



I.8.2 Type de bobinage

La (Figure I.18) montre deux configurations différentes pour une machine triphasée ayant 24 encoches et deux paires de pôles. La configuration du bobinage dépend des paramètres caractéristiques comme le coefficient de distribution et le coefficient de raccourcissement indiqués dans plusieurs ouvrages. L'utilisation de l'enroulement régulier à une couche est généralement destinée, mais pas forcément, aux machines de faible puissance c.-à-d. aux machines ayant un diamètre statorique intérieure faible. Cependant, l'enroulement imbriqué, qui impose la présence de deux bobines par encoche, est pratiquement réservé aux machines de moyenne et de grandes dimensions. Cet enroulement présente l'avantage de réduire non seulement la masse de cuivre utilisée, donc du coût de fabrication, mais aussi d'éliminer les harmoniques de rangs supérieurs, de réduire des chutes ohmiques ainsi que le flux de fuite et la longueur des têtes de bobines [20][11].

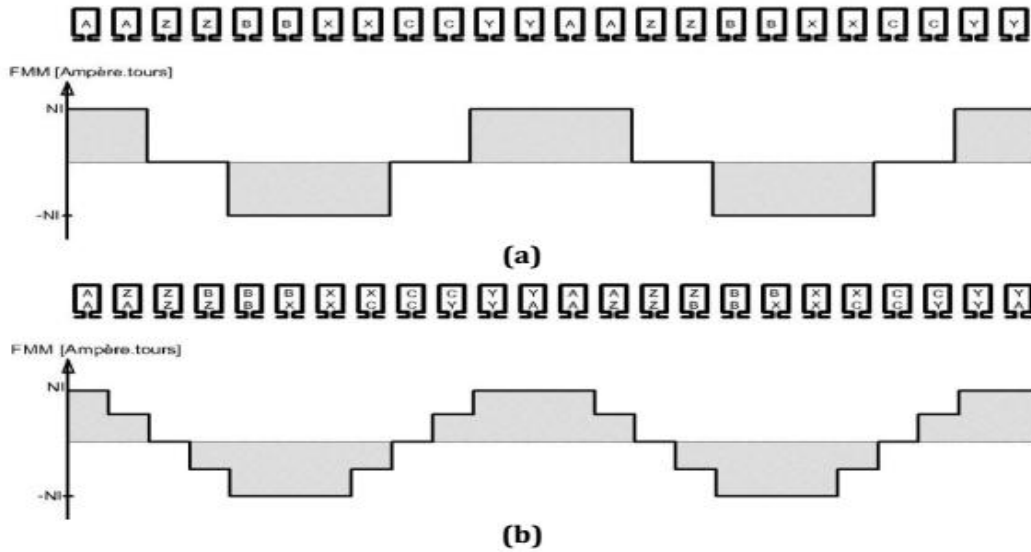


Figure I.18 : Différents types de bobinages : a) une couche, b) double couche.

I.9.Principaux matériaux utilisés dans les machines électriques

Les matériaux utilisés dans les machines électriques se classent en fonction de la largeur de leurs propriétés magnétiques cycle en deux grandes familles. La première est des matériaux magnétiques durs, appelés aussi (aimants permanents) car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur. La seconde est des matériaux magnétiques dits doux qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe. Peuvent être aimantés à l'aide de champs magnétiques faibles. Ils sont utilisés dans les machines électriques pour canaliser et concentrer le flux magnétique [20].

I.10.Les aimants permanents

I.10.1.Aperçu sur son historique

Les aimants permanents ont une longue histoire qui commença dès l'antiquité. La boussole, inventée par les chinois, en fut la première application et certaines maquettes datent du **III^{ème} siècle** avant **JC**. Son utilisation pour la navigation maritime date probablement du **XII^{ème} siècle**. Elle fut introduite en Europe environ deux siècles plus tard et au **XVIII^{ème} siècle**, Londres devient le centre mondial de la fabrication des aimants. Au **XXI^{ème} siècle**, trois principales familles d'aimants permanents ont été développées à savoir : les ferrites, les céramiques et les terres rares [12].



Figure I.19 : aimant permanent.

I.10.2.définition et représentation des aimants permanents

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieure [10]

Les aimants utilisés dans les machines synchrones ont pour fonction principale la création du flux inducteur. Ils doivent permettre l'obtention d'une puissance massique élevée, Ce qui réduit le volume de la machine. D'autre part une faible sensibilité à la température est également indispensable, ce qui limite la désaimantation en fonctionnement normal. Dans cette condition on peut obtenir le couple nominal pour tous les régimes de fonctionnement [2].

I.10.3.Le magnétisme des aimants

La préparation des matériaux à aimants permanents et sa structure lui confèrent la capacité de créer un champ magnétique stable à une grande énergie et à une induction élevée. Le champ coercitif élevé est assuré par une grande anisotropie et la gestion des inclusions non magnétiques pendant le processus d'aimantation où l'on cherche à diminuer la nucléation des domaines magnétiques inverses accrochés à ces inclusions. C'est ainsi qu'on aboutit à un cycle d'hystérésis quasiment rectangulaire [34].

I.10.4.Les structures des aimants permanents

Les aimants permanents sont faits de grains magnétiques assemblés. On distingue deux grandes classes selon leur structure : Les aimants orientés et les aimants isotropes.

Dans les aimants isotropes présentés sur la(FigureI.20). Les grains sont polycristallins ou monocristallins mais non orientés, les moments magnétiques sont orientés au hasard dans l'espace.

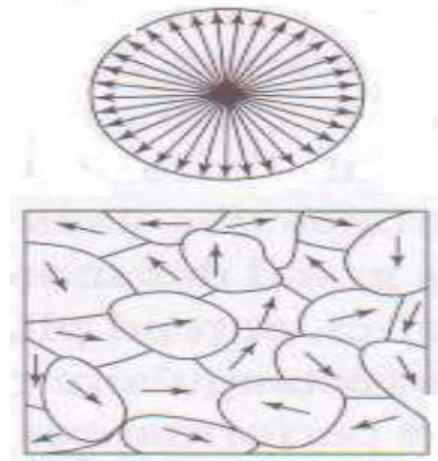


Figure I.20 : Moments non orientés au hasard des nano cristallites enchevêtrés d'un Aimant isotrope.

Par contre, dans les aimants orientés (Figure I.21), les axes de facile aimantation se distribuent selon un cône plus ou moins ouvert autour de la direction d'orientation commune. Ce type d'aimant est le plus utilisé dans les rotors des machines synchrones, pour plusieurs raisons.

Le Samarium Cobalt : Sm_2Co_{17} appartient à la classe des aimants à grains orientés [34].

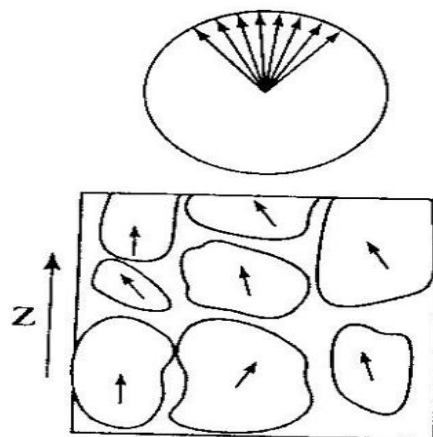


Figure I.21 : Cristallites d'un aimant orienté et moments magnétiques orientés selon Z
Phase magnétique dure (blanc) et phase non magnétique (grisé).

I.10.5. propriétés d'aimants permanent

Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan B-H (Figure I.22).

En ce qui concerne les aimants, les trois paramètres essentiels pour les machines électriques sont:

- ❖ L'induction rémanente B_r , qui indique les performances potentielles des aimants (plus B_r est important, plus l'aimant est performant).
- ❖ Le champ coercitif H_c qui donne un premier ordre de grandeur de mesure de la résistance de l'aimant à la démagnétisation durant les démarrages, les courts-circuits ... etc[9].
- ❖ Le champ coercitif H_{CB} , caractérise le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable [10].
- ❖ le champ coercitif de polarisation, H_{cJ} , qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau, la est totale et irréversible.
- ❖ Le troisième paramètre est le "produit d'énergie" $(-B.H)$ max. Cette énergie est disponible pour une utilisation dans l'espace qui environne l'aimant. Elle définit une sorte "d'énergie spécifique".

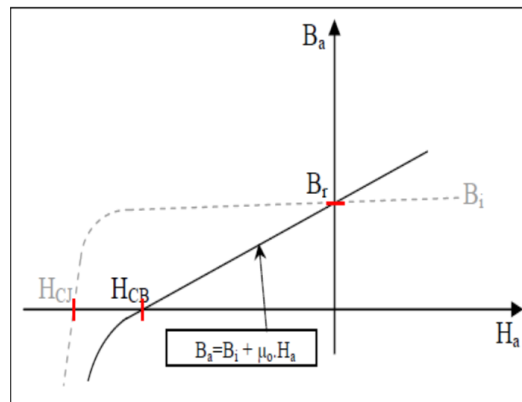


Figure I.22 : Courbe de désaimantation des aimants.

Ceux sont, ces trois dernières grandeurs qui permettent de classer les aimants permanents. Néanmoins suivant l'application envisagée, d'autres critères portant sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques, en dehors du coût et des difficultés d'usinage, sont parfois déterminants dans le choix des matériaux pour aimants. En effet, la plupart des aimants performants présentent une difficulté d'usinage et l'obtention d'un bon état de surface est onéreuse. De plus, le point de Curie est un facteur qu'il faut prendre en considération. La température limite joue un grand rôle dans la stabilité et la performance des aimants [9].

I.10.6 Les différents types des aimants permanents

Il existe aujourd'hui, principalement, trois familles de matériaux conduisant à l'essentiel des applications sur le marché des aimants permanents. Ces trois familles sont dans l'ordre d'apparition : les aimants métalliques, les ferrites et les terres rares [9].

I.10.6.1 Les aimants métalliques

Il existe plusieurs types d'aimants métalliques ; les plus intéressants pour être utilisés dans les machines électriques sont ceux du type alliages ALINCO (alliage Fer-Aluminium Nickel Cobalt). Les ALINCO, sont durs et fragiles, Ils peuvent être isotropes ou anisotropes. Leur induction rémanente B_r est relativement élevée [9], mais il est un champ coercitif très faible ce qui pose des gros problèmes de désaimantation, Les ALINCO sont utilisés dans les instruments de mesure où leur grande stabilité thermique constitue un paramètre essentiel, ainsi que comme capteurs [10]. Le plus grave inconvénient est qu'en cours de fonctionnement, ils nécessitent généralement une réaimantation [9].

I.10.6.2. Les ferrites

Les ferrites sont des composants d'oxyde de Fer, de Baryum et de Strontium. Ils sont obtenus par frittage. Ils sont beaucoup plus robustes et relativement peu coûteux [10]. Ces matériaux céramiques présentent une induction rémanente relativement réduite. Ce qui leur confère une bonne résistance à la démagnétisation [9]. Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont tout de même imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée permettant de les employer dans les machines. En outre, les ferrites résistent bien à la chaleur mais pas au froid. Pour les machines de hautes technologies employées dans le transport, ils se montrent insuffisants en puissance et en compacité [12].

I.10.6.3 Terre rares

Ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevé. Ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition [1], à tendance à freiner l'extension de leur utilisation. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les Palsto-Néodyme. C'est un mélange de Néodyme-Fer-Bore avec un liant plastique. Cette matière permet de réaliser des pièces moulées, ce qui facilite l'assemblage et diminue le nombre de pièces mécanique [9].

I.10.6.4 Samarium Cobalt (SmCo)

Ce sont les premiers aimants terres rares apparus sur le marché. Leur énergie est très supérieure à celle des ferrites, de même que leur prix. Les aimants de type Samarium-Cobalt sont connus dans le milieu industriel principalement sous deux formes, $SmCo_5$ et Sm_2Co_{17} . Ils présentent à l'état massif des propriétés très intéressantes. Le domaine d'utilisation de ces aimants se limite peu à peu aux applications fonctionnant à haute température et à champ inverse élevé (militaire, nucléaire, ...) [23].

I.10.6.5 Néodyme-Fer-Bore

Le Néodyme-Fer-Bore est le type d'aimants le plus récent. Sa première utilisation remonte à 1985. Dans un court intervalle de temps, il a prit plus d'ampleur au niveau de sa production. Le **NdFeB** est presque le matériau idéal pour les excitations des machines électriques. L'induction qu'il permet de produire dans l'entrefer est importante, son champ coercitif est élevé.

Ils sont constitués essentiellement de $Nd_2Fe_{14}B$. Ils sont moins coûteux que les Samarium-Cobalt et présentent des propriétés magnétiques supérieures.

La (Figure I.23) représente les différentes images des aimants permanents utilisés dans les machines synchrones à aimant permanent (les Alnico, terres rares et les ferrites).



(a) Alnico



(b) Samarium Cobalt ($SmCo_5$)



(c) Ferrites en Strontium



(d) Samarium Cobalt Sm_2Co_{17}



(e) Ferrites en Baryum

(d) NdFeB

Figure I.23 ; quelques images des différents types des aimants permanents.

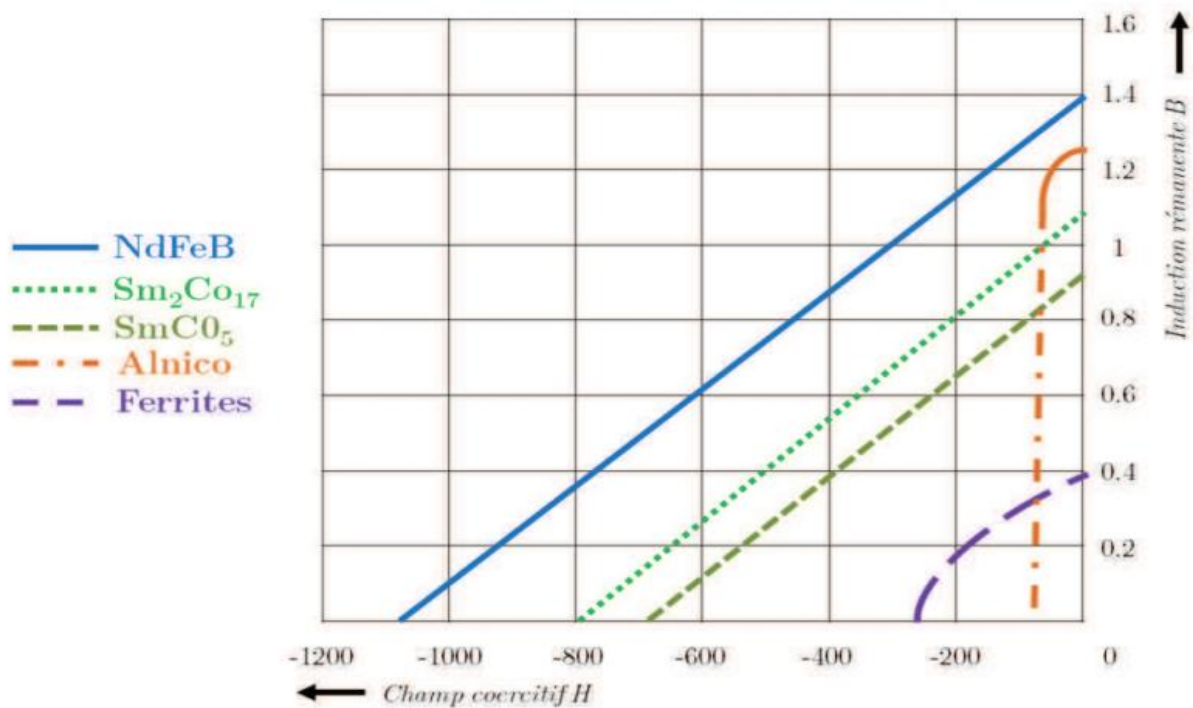


Figure I.24 : Courbe de désaimantation des principaux types d'aimants.

Pour comparer ces aimants entre eux, nous avons rassemblé quelques caractéristiques dans les tables suivantes. Pour chaque type d'aimant [23].

Tableau I.2 : Exemple de propriétés magnétique des aimants.

Types d'aimants	Ferrites	ALNICO	Smco	NdFeB
$B_{r_{max}}$ [T]	0.43	1.35	1.08	1.48
$H_{CB_{max}}$ [kA/m]	280	140	851	1033
$B_{H_{max}}$ [kJ/m ³]	30	88	255	422
T_{max} [C°]	250	550	350	230
T_{max} de Curie [C°]	450	550	800	350
Résistivité [$\mu\Omega\text{cm}$]	Plus de 1000	47	86	140 a 160
Résistance à la corrosion	Bonne	Moyenne	Médiocre	Médiocre
Points positifs	Faible coût, bonne tenue en température	Faible coût, haute tenue en température	Puissant, bonne tenue en température	Le plus puissant
Points négatifs	Faible puissance magnétique	Démagnétisable par un champ externe fort	Fragile, coût élevé	Fragile, coût élevé

Les propriétés magnétiques des aimants permanents diminuent avec la température, il y'a un risque de démagnétisation totale si c'est la température est élevée le tableau montre la sensibilité des différents aimants à la température .et pour éviter le risque de supprimer le magnétisme totale des aimants permanents il doit utiliser un système de refroidissement des aimants permanents.

Pour renforcer le refroidissement du rotor, il est conseillé d'installer des canaux ou des ventilateurs au rotor (Figure I.25). Cependant, ceci va forcément augmenter le prix de la machine. De plus, la fiabilité de la machine sera diminuée. Pour diminuer les inconvénients d'une machine à aimants permanents au rotor, des machinistes ont pensé à déplacer les aimants du rotor au stator. Ainsi les performances mécaniques et thermiques peuvent être améliorées tout en gardant une haute densité du couple de la machine à aimants permanents. De plus, le refroidissement des aimants se trouvant au niveau du stator est plus facile car ceux-ci sont proches du système de refroidissement externe. Ainsi, la chaleur produite dans les aimants peut être évacuée sans traverser l'entrefer Il est donc plus facile de limiter l'augmentation de la température dans les aimants par rapport aux machines à aimants permanents au rotor [20].

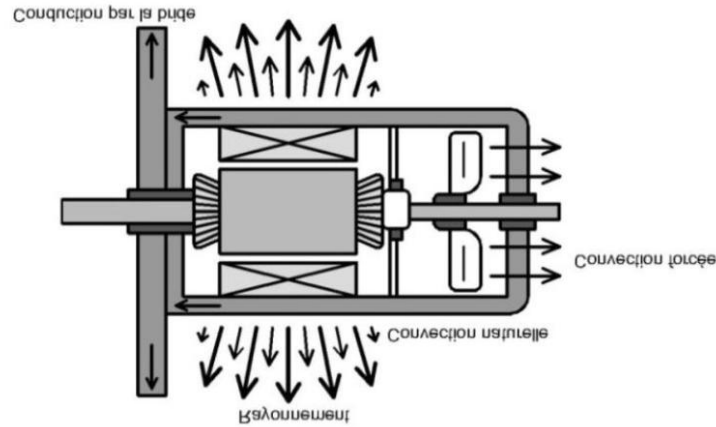


Figure I.25 : Modes de refroidissement des machines tournantes.

(Figure I.26) montre l'évolution et les perspectives à venir de la densité énergétique des aimants permanents. La valeur maximale actuellement atteinte pour tous les aimants permanents est de 470 kJ/m³ avec le matériau NdFeB fritté qui fait partie des terres rares. La limite technique estimée pour les aimants en Néodyme est d'environ 485 kJ/m³, tandis que pour tous les aimants permanents confondus, il est de 720 kJ/m³. Enfin, la limite théorique, mais pratiquement irréalisable, pour tous les aimants permanents est de 960 kJ/m³ [12].

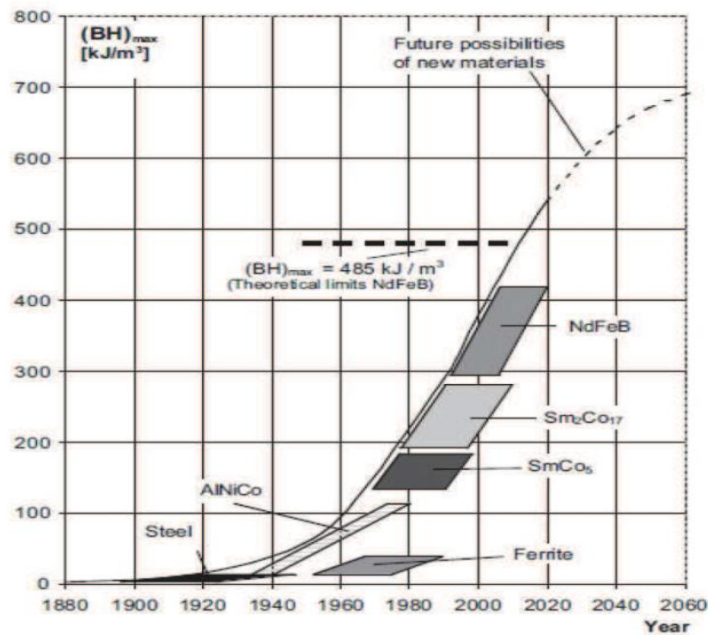


Figure I.26 : Evolution et perspective de la densité énergétique des aimants permanents.

I.10.7 Origines des pertes dans les aimants

Les matériaux durs possèdent une grande anisotropie magnéto-cristalline uni-axiale, les parois du domaine rencontrant beaucoup plus de difficultés pour se déplacer par rapport aux matériaux doux. Ainsi, le formalisme de séparation de pertes de Bertotti très employé dans les matériaux doux, n'est pas pertinent dans un matériau magnétique à aimants permanents.

Les pertes dans les aimants permanents d'une machine synchrone sont essentiellement dues aux courants induits macroscopiques créés par la variation de l'induction $B(t)$ sur le matériau conducteur massif. Ces pertes augmentent la température de l'aimant, et elles peuvent modifier les propriétés et notamment provoquer la démagnétisation de l'aimant si sa température dépasse le point du curie [34].

I.10.8 Stabilité des aimants

Le flux produit dans un circuit magnétique par un aimant, n'est pas rigoureusement stable ! Il décroît avec le temps et varie sous l'influence de contraintes extérieures. C'est pour quoi, il nous a paru utile d'ajouter cette section qui a pour objet d'énumérer les origines principales de désaimantation :

- ❖ Les variations de l'induction peuvent avoir pour origine les modifications de structure de l'alliage qui constitue le matériau magnétique : soit que cette structure soit instable comme les aciers martensitiques, ou les phénomènes de diffusion dans l'état solide provoquent un tel réarrangement des atomes.
- ❖ Les champs magnétiques extérieurs peuvent modifier l'arrangement des domaines ou l'alignement des moments magnétiques et par suite une réduction de l'induction rémanente.
- ❖ Les chocs mécaniques contribuent également pour la désaimantation qui reste imperceptible, on estime qu'un aimant sujet à des essais mécaniques retient 99% de son aimantation originale.
- ❖ Les expériences effectuées sur des aimants travaillant dans des réacteurs nucléaires ont montré que ces matériaux sont peu sensibles aux irradiations par les neutrons.
- ❖ L'un des ennemis des aimants : la corrosion qui s'exacerbe lors de la présence des acides et des solutions frottement alcalines.
- ❖ La présence d'un corps ferromagnétique étrange, tel qu'une masse de fer, au voisinage ou en contact d'un aimant placé ou non dans son circuit magnétique, peut-être une cause sérieuse de désaimantation irréversible lorsque cette masse est placée du côté latérale de l'aimant.
- ❖ A mesure que la température augmente, la densité de flux produite par l'aimant diminue et à une température élevée (point de curie), l'aimant perd complètement sa perméabilité de même que ses propriétés d'aimant permanent. Cette haute température provoque en effet une vibration atomique intense qui détruit l'orientation des domaines [35].

I.11.Machine à aimants enterrées

Les machines à aimants enterrées sont largement utilisées dans les applications industrielles où le rapport de la valeur nominale à la vitesse maximale est supérieure à 2 dans les applications comme les voitures électrique hybride et pures. Ces moteurs sont alimentés par un onduleur qui se traduit par un temps à haute fréquence courants harmoniques [19]. Le risque de démagnétisation des aimants est aussi diminué grâce au champ de réaction d'induit qui ne les traverse plus directement. Il existe également un couple de saillance qui s'ajoute au couple moyen. De plus, l'induction d'entrefer est plus élevée conférant ainsi une compacité et un rendement supérieurs aux autres machines. Par ailleurs, les MSAP à aimant enterrées à concentration de flux augmentent la fiabilité et la robustesse, critères nécessaires aux applications embarquées du transport. Les aimants sont protégés contre la démagnétisation, en particulier lors du deflusage, et contre les dommages physiques dus à la corrosion. Pour toutes ces raisons, le choix de la MSAP s'est porté sur cette ayant les aimants enterrés à concentration de flux [12].

Dans ce qui suit, nous discuterons plusieurs structures de la machine synchrone à aimant enterrée :

La (Figure I.27) montre les deux types de moteurs IPM [19].

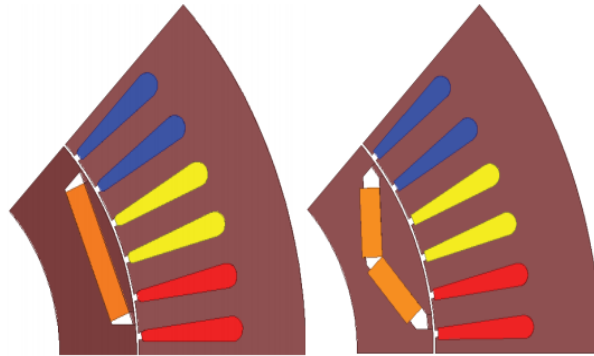


Figure I.27 : moteurs IPM.

Au cours de la dernière décennie, il y a eu un regain d'intérêt pour les développements de la MSAP applications. En particulier, un vaste corpus de recherches a été consacré à l'analyse et la conception de l'aimant permanent synchrone à début de ligne moteurs à la fin des années 70 et dans les années 80. Dans ces machines les aimants sont enterrés sous une cage d'écureuil à rotor enroulement qui, comme dans un moteur à induction, se trouve dans des fentes près de l'air comme indique dans la section unipolaire de la (figure I.28).

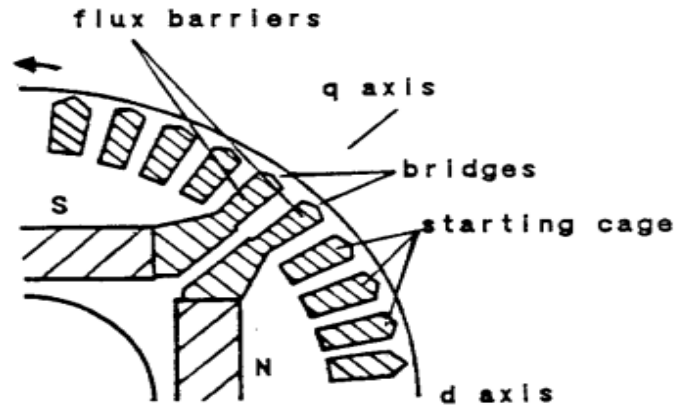


Figure I.28 : coupe transversale du rotor unipolaire d'un départ de ligne à quatre pôles, moteur synchrone à aimant enterrée.

Les aimants permanent des sont enfouis dans le noyau du rotor robuste capable de haute vitesse avec un fonctionnement silencieux et une meilleure dynamique performance. Un exemple de géométrie pour cela le type de machine est indiqué sur la (figure I.29). Cependant, on peut signaler qu'il existe un compromis entre la performance d'affaiblissement du flux et la vitesse élevée fonctionnement et les performances de couple avec inférieur ou inférieur fonctionnement a vitesse nominale [22].

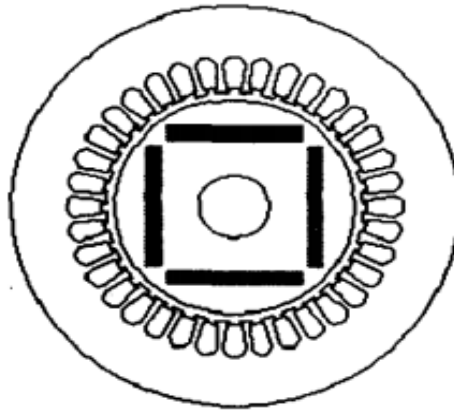


Figure I.29 : structure IPMSM de type enterré.

La (figure I.30) présent les coupes transversales de machine synchrone conventionnelles avec rotors internes et externes, cette structure se compose de dents de stator parallèles connecté a l'extrémité de la dent intérieure pour la stabilité mécanique. L'inconvénient de cette conception est la nécessité de l'enroulement distribue des machines a reluctance synchrone, cependant cette conception offre une augmentation significative du couple par 7 fois et réduction de l'ondulation du couple de 50% par rapport au stator double face [21].

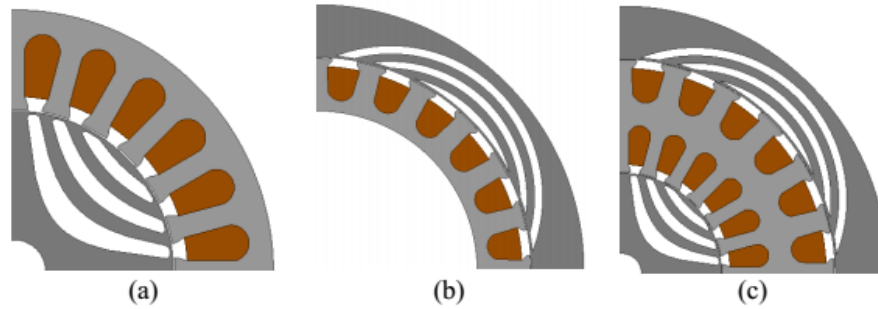


Figure I.30 : coupes transversales : a) rotor externe conventionnel, b) et c) double face machines a reluctance synchrone à double rotor stator.

La coupe transversale du prototype est illustrée dans la (figure I.31). Les aimants sont insérés dans les barrières de flux. Ensuite, le rotor est coulé avec de la résine époxy. Ensuite, les nervures au rayon extérieur sont enlevées par fraisage. La structure est maintenue par un manchon de rotor en fibre de verre. La conception sans âme offre une meilleure utilisation des aimants en ferrite en raison de l'absence de court-circuit le long des côtes. La conception du rotor est décrite dans le stator fournit un enroulement distribué [27].

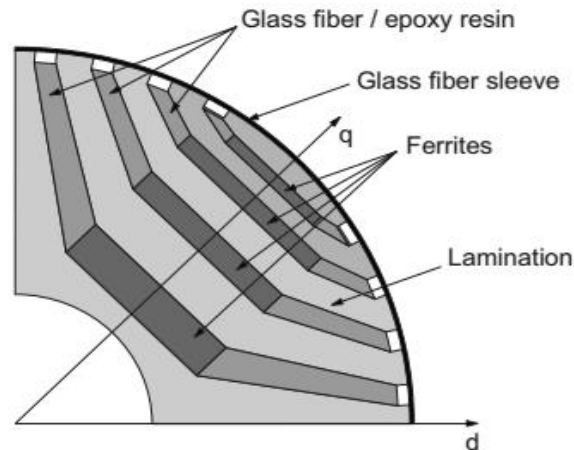


Figure I.31 : coupe transversale du rotor sans âme.

I.10 Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons réalisé une étude générale sur la machine synchrone. Dans un premier temps, nous avons abordé une description de la machine synchrone à aimants permanents avec une présentation de leurs différentes structures avec les avantages et inconvénients et ses domaines d'application. Ensuite, nous avons parlé sur les enroulements appliqués dans des machines synchrones à aimants permanents après avoir passé une présentation détaillée des aimants permanents, son histoire, ses caractéristiques, ses propriétés,

ses différents types, ses structures et sa stabilité. Enfin nous avons étudié les différentes structures de la machine synchrone à aimants enterrés.

CHAPITRE II

MODELISATION D'UNE

MACHINE SYNCHRONE A

AIMANTS PERMANENTS

Chapitre II : Modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents

II.1 Introduction

L'étude et l'analyse de champ électromagnétique sont de grande importance dans diverses applications technologiques. La modélisation de phénomènes électromagnétiques constitue un intérêt majeur dans de nombreux domaines d'application.

L'objectif principal de cette étude est basé sur la conception des machines électrique. La modélisation est nécessaire et importante. Dans ce qui suit nous présentons les différentes méthodes de la modélisation. Le logiciel **FEMM** sera exploité comme un outil important dans ce travail.

II.2 Description 2D du champ électromagnétique dans les machines électriques

Le calcul du champ magnétique au niveau d'une machine électrique tournante est un problème tridimensionnel. Néanmoins, sur une longueur importante de la machine, on peut considérer que les champs magnétiques sont situés dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation et que les courants inducteurs et induits sont parallèles à cet axe. Toutefois, l'approximation 2D ne permet pas de prendre en compte les effets d'extrémités. Les vecteurs inductions magnétiques \vec{B} et champ magnétiques \vec{H} étant contenus dans le plan d'étude, on peut alors choisir un potentiel vecteur magnétique \vec{A} (dans le cas d'un problème formulé en termes de potentiel vecteur) n'ayant qu'une seule composante suivant l'axe de la machine. Cette composante ne dépend que des coordonnées x , y et du temps t [32].

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A(x,y,z) \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Le potentiel vecteur magnétique vérifie la jauge de Coulomb de façon implicite. L'induction magnétique \vec{B} , dérivant de ce potentiel, a pour composantes :

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} +\frac{\partial A}{\partial y} \\ -\frac{\partial A}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Les équations gouvernant la diffusion du champ électromagnétique sont :

$$\text{Div}(\text{vgrad}(\vec{A})) - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + J_s = 0 \quad (\text{II.3})$$

Où J_s désigne la densité de courant source.

En absence de densité de courant superficielle, les conditions de passage entre deux milieux (1) et (2) sont :

$$A_1 = A_2 \quad (\text{II.4})$$

$$V_2 \frac{\partial A_1}{\partial n} = V_2 \frac{\partial A_2}{\partial n} \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas où il y a un mouvement différentiel entre les milieux 1 et 2, le potentiel vecteur magnétique et le champ magnétique tangentiel conservent leurs continuités (invariants relativistes du premier ordre) de sorte que si le milieu (1), référencé par R1, est animé à la vitesse v_r par rapport au milieu (2), référencé par R2, il s'ensuit [32] :

$$A_1(\vec{x} + \vec{v}t, t)|_{R_1} = A_1(\vec{x}, t)|_{R_2} = A_2(\vec{x}, t)|_{R_2} \quad (\text{II.6})$$

$$V_1 \frac{\partial A_1}{\partial n}(\vec{x} + \vec{v}t, t)|_{R_1} = V_1 \frac{\partial A_1}{\partial n}(\vec{x}, t)|_{R_2} = V_2 \frac{\partial A_1}{\partial n}(\vec{x}, t)|_{R_2} \quad (\text{II.7})$$

II.3 Modélisation des machines synchrones

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour modéliser les machines synchrones. Elles sont classées en trois grandes familles : analytiques, semi-analytiques et numériques, chacune avec ses avantages et ses inconvénients.

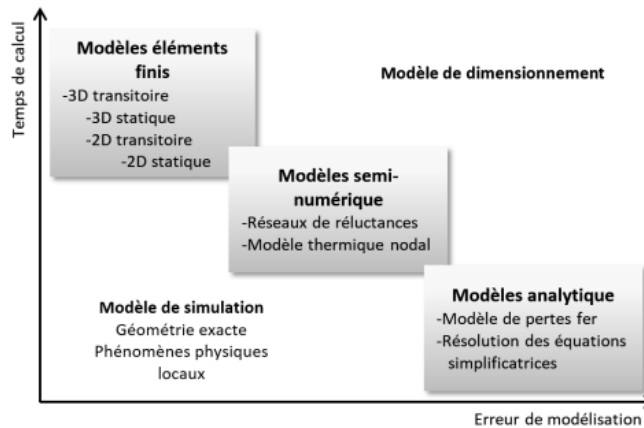


Figure II.1 : Front de Pareto des modèles utilisés pour la conception des machines électriques.

II.3.1 La méthode analytique

La méthode analytique est très souvent utilisée pour modéliser les machines. Le point fort de cette méthode est son temps d'exécution très faible. La granularité obtenue avec cette méthode dépend fortement des hypothèses qui ont été posées. Il est tout à fait possible d'obtenir un

modèle très fin. Bien meilleur que par une méthode éléments finis, mais les hypothèses émises sont souvent incompatibles avec la modélisation souhaitée

Ainsi il est tout à fait possible de calculer le champ magnétique et électrique exact d'un conducteur de section ronde soumis à une courante alternative haute fréquence et d'observer l'effet de peau. Par contre il ne sera pas possible de modéliser des conducteurs de sections rectangulaires sauf à faire l'hypothèse d'un conducteur infiniment long sur une dimension.

L'utilisation des méthodes analytique demande donc d'analyser et de poser les bonnes hypothèses et oblige donc le concepteur de très bien connaître le comportement des composants magnétique afin d'être sûr de la validité et des limites du modèle.

Les modèles analytiques basés sur la résolution de l'équation de Poisson sont inadaptés dès que la structure devient complexe. La méthode analytique, basée sur les équations de Maxwell sous forme intégrales, peut approcher la solution sans toutefois assurer la précision requise [30].

II.3.1.1 Les équations de Maxwell

En **1865**, **James Clark Maxwell** a posé les fondements de l'électromagnétisme moderne par les équations qui portent son nom : les équations de Maxwell. Il a réuni sous forme d'équations locales différents théorèmes (Gauss, Ampère, Faraday) alors traduits sous forme d'équations intégrales. Les équations de Maxwell donnent ainsi un cadre mathématique précis au concept fondamental de champ introduit en physique par Faraday dans les années **1830** [5].

Les équations de Maxwell sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations sont généralement interdépendantes de faite que les phénomènes magnétique et électrique sont couples, ainsi qu'elles sont valables dans les différents milieux (air, milieux homogènes, non linéaires et anisotropes...) [30].

Première équation de Maxwell-ampère

$$\left. \begin{array}{l} \overline{rot\vec{H}} = \vec{J}_{total} \\ \vec{J}_{total} = \vec{J}_c + \vec{J}_D \end{array} \right\} = \overline{rot\vec{H}} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

\vec{H} : Vecteur champs magnétique [A/m].

\vec{D} : Vecteur induction électrique (vecteur déplacement électrique) [C/m²].

\vec{J}_c : Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m²].

\vec{J}_D : Vecteur densité du courant électrique de déplacement [A/m²].

Deuxième équation de Maxwell-faraday

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

\vec{E} : Vecteur champ électrique [v/m].

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T].

Troisième équation de Maxwell-Gauss

$$\text{Div}\vec{D} = \rho \quad (\text{II.10})$$

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

Quatrième équation de Maxwell : théorème de conservation de flux magnétique

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.11})$$

Cinquième équation de Maxwell : Lois constitutives des milieux $\mathbf{B}=\mu(\mathbf{H})$. $\mathbf{H}=\mathbf{v}(\mathbf{B})$.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \text{ ou, } \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{II.12})$$

ε : Permittivité électrique [F/m].

μ : Perméabilité magnétique [H/m]

\mathbf{v} : relativité magnétique [m/H].

A ces équations doit être associée la loi d'ohm généralisée

$$\vec{J}_c = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{u} \wedge \vec{B}) \quad (\text{II.13})$$

Avec :

\vec{u} : Vecteurs vitesse des pièces conductrices susceptible de se déplacer [m/s].

σ : Conductivité électrique [s/m].

\vec{J}_{ex} : Densité des courants d'excitation (source) [A/m²]

Par les équations de Maxwell, nous présenterons des modèles plus simples du couplage électromagnétique entre les effets magnétiques et électriques qui peuvent être séparés dans certains cas.

Le modèle électrostatique

Dans ce modèle, la distribution des charges électriques statique ne dépasse pas le temps, de sorte que le champ magnétique résultant ne change pas avec le temps.

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.14})$$

Les expressions des équations de ce modèle est comme suit :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.16})$$

$$D = \epsilon E \quad (\text{II.17})$$

La relation (II.15) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique v , telle que

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{Grad}} V \quad (\text{II.18})$$

Le modèle se ramené alors a l'équation

$$\text{Div}(\epsilon \overrightarrow{\text{Grad}} V) + \rho = 0 \quad (\text{II.19})$$

Le modèle magnétostatique vectorielle

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique soit produit par des sources indépendantes du temps le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ et les champs électrique \vec{E} et magnétiques \vec{B} sont découplés, par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls. On obtient alors les équations suivantes :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.20})$$

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.22})$$

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

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.22})$$

Pour que \vec{A} soit totalement défini, on doit fixer divergence en utilisant la jauge de coulomb

$$\text{Div}\vec{A} = 0 \quad (\text{II.23})$$

A partir de ces équations, on obtient

$$\overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}\right) = \vec{j} + \overrightarrow{\text{rot}}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{B}_r\right) \quad (\text{II.24})$$

II.3.2 La méthode semi-analytique

Les méthodes semi-numériques (semi-analytique) sont analytiques et non linéaires. Ils sont qualifiés de cette manière car leur résolution se fait numériquement en raison de la non-linéarité. Ils ont une position intermédiaire entre les modèles analytiques et les modèles éléments finis pour : Le temps de résolution, la précision de la modélisation et la capacité à fournir les dérivées. Parmi ces méthodes, on peut citer :

- ❖ Les réseaux de perméances
- ❖ Transformation conforme
- ❖ Les modèles thermiques nodaux
- ❖ Les schémas électriques équivalents...etc.

La méthode demi-analytique cherche à mettre le problème sous forme de circuit électrique équivalent. Chaque élément du circuit est déterminé analytiquement et la résolution est numérique en mettant le problème sous forme matricielle grâce aux équations de Kirchhoff. Il suffit alors d'un schéma numérique d'inversion de matrice [30].

II.3.2.1 La méthode de transformation conforme

La transformation conforme est la représentation d'une surface limitée liée à un plan d'une autre variable complexe. La distribution du champ entre les frontières d'une forme complexe, comme la structure d'ouverture des encoches, est généralement difficile à calculer, il devient donc approprié de trouver une transformation permettant de modifier un plan complexe en un autre dont lequel les formes des frontières deviennent plus simples et pour lesquelles la distribution du champ est régulière et connue.

Le principe de base de cette méthode est expliqué dans le cas où l'encoche est infiniment profonde comme le montre la (FigureII.2) [4].

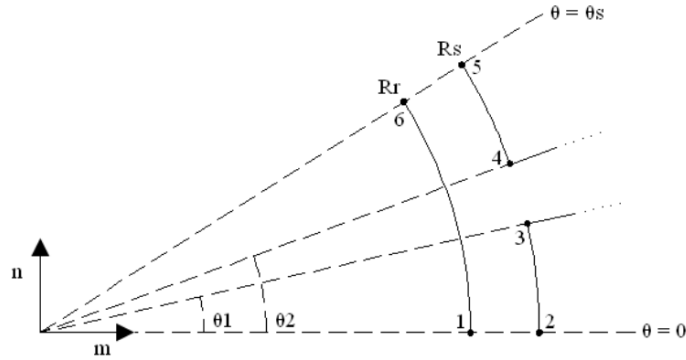


Figure II.2 : Représentation de l'ouverture de l'encoche dans le plan S.

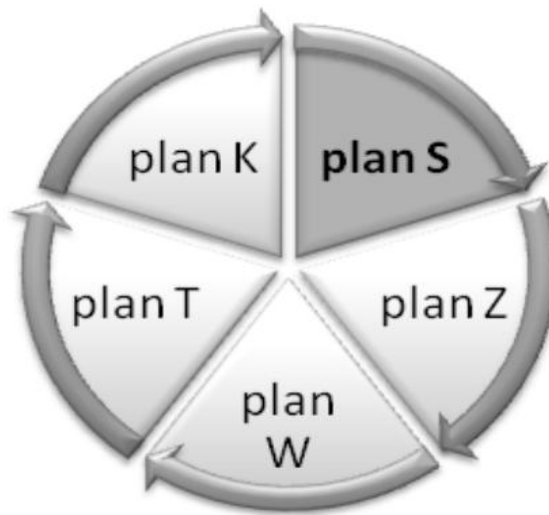


Figure II.3 : Principales étapes de la transformation conforme.

II.3.2.2 La méthode réseaux de ré reluctances

La méthode des réseaux de ré reluctances (ou de perméances) est une des méthodes les plus anciennes utilisée pour la modélisation et l'analyse des dispositifs électromagnétiques. Son utilisation dans le domaine de l'électrotechnique est par exemple antérieure à celle des éléments finis. Cependant, de nos jours, son manque de généralité a limité son utilisation en comparaison de la modélisation par la méthode des éléments finis [16].

Les modèles ré reluctants font parties des modèles dit semi-analytiques ou semi-numériques. Ces modèles s'appuient sur la représentation de la machine par un circuit magnétique équivalent. Pour chaque trajet de flux et suivant la nature du tube de flux, il est possible de symboliser une ré reluctance magnétique équivalente dépendant du matériau ou de l'air. On a alors accès aux valeurs des flux et des inductions pour chaque élément du circuit. Par rapport aux modèles analytiques et numériques, les modèles ré reluctants ont l'avantage de disposer d'un bon compromis entre la rapidité et la finesse des résultats. L'appellation semi-analytique provient du fait que la formulation des

éléments du réseau se fait de façon analytique et que la résolution du système d'équations est numérique.

Souvent, on n'aboutit pas à la dérivée formelle des grandeurs. En fait, contrairement à ce qu'on croit souvent à tort, il est tout de même possible de dériver de manière formellement exacte beaucoup de modèles non-explicites.

Par rapport aux modèles purement analytiques, les modèles réductants ont aussi l'avantage de prendre en compte plus de phénomènes physiques tels que la saturation magnétique, les harmoniques dans certains cas, les pertes fer, etc. En revanche, même s'il est possible d'intensifier la complexité du modèle par le rajout d'éléments supplémentaires, leur niveau de finesse reste tout de même inférieur aux modèles éléments finis.

Enfin, en temps de développement, les modèles réductants sont encore situés entre les modèles analytiques et numériques. Il est nécessaire de connaître le trajet des flux magnétiques et d'identifier les bonnes réductances aux bons emplacements. Pour ce faire, on visualise les trajets de flux grâce à des simulations éléments finis. L'inconvénient est qu'avec un circuit réductant, il n'est pas possible d'être rigoureusement précis pour chaque niveau de saturation [12].

II.3.2 Les méthodes numériques

Les méthodes numériques sont plus ou moins utilisées selon le problème et la structure à étudier. Ces méthodes sont utilisées seules ou en combinaison. Parmi ceux-ci méthodes nous citerons la méthode des différences finies, la méthode des intégrales de frontières, la méthode des volumes finis et enfin la méthode des éléments finis [32]. Dans le cas de la structure étudiée dans notre travail, on applique la méthode des éléments finis.

- a) **Méthode des différences finies (MDF)** : La méthode des différences finies, présente une technique de résolution des équations aux dérivées partielles, par l'approximation de dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée en chacun des nœuds du domaine par un développement limité en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique pour chaque nœud. La résolution du système d'équations algébriques permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude. L'inconvénient de cette méthode est la précision et la manque de la flexibilité [30].
- b) **Méthode des Volumes Finis (MVF)** : La méthode des volumes finis consiste à effectuer un bilan local sur des volumes élémentaires (les éléments du maillage), en intégrant sur ces éléments les équations écrites sous forme de loi de conservation. Cette approche exprime les échanges qui s'opèrent entre les différents éléments du maillage via la définition de flux numériques aux interfaces.

- c) **La méthode des intégrales des frontières (MIF)**: Cette méthode est largement utilisée pour l'étude de structure tridimensionnelle ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. Cette méthode permet de ramener le maillage à la frontière du domaine ainsi le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. La **MIF** utilise le théorème de **GREEN OSTROGRADSKI**.
- d) **Méthode des Eléments Finis (MEF)** : La méthode des éléments finis permet de représenter finement les différentes grandeurs dans le système. Cependant, les résultats obtenus restent « gourmands » en ressources informatiques, et ne peuvent donc pas être directement exploités dans les structures actuelles de commande ou de diagnostic. La détermination des champs électromagnétiques est d'un grand intérêt pour la conception des machines électriques. L'analyse de ces phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution des équations de Maxwell dont la complexité est telle qu'elle est exclue dans la plupart des cas du formalisme analytique [17].

II.4. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles (**EDP**) des problèmes physiques, elle est fondée sur la résolution des équations de Maxwell [29].

II.4.1. Présentation la méthode des éléments finis

Historiquement, les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années **1940**, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1950-1960. En **1970**, Silvestre et son équipe de l'université **MC Gill à Montréal** se sont intéressés, à l'adaptation de cette méthode, à la résolution des problèmes elliptiques de l'Electrotechnique [29].

La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques. De plus un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques et magnétique peut être réalisé [17].

II.4.2. Analyses des éléments finis

Bien que les équations différentielles d'intérêt semblent relativement compactes, il est généralement très difficile d'obtenir des solutions de forme fermée pour toutes les géométries, sauf les plus simples. C'est là que l'élément finis l'analyse entre en jeu. L'idée des éléments finis est de décomposer le problème en un grand nombre de régions, chacune avec une géométrie simple (par exemple des triangles). La (Figure II.4) montre une carte du Massachusetts divisé en

triangles. Sur ces régions simples, la «varie» solution pour le potentiel souhaité est approché par une fonction très simple. Si suffisamment d petites régions sont utilisées, le potentiel approximatif correspond étroitement à la solution exacte. L'avantage de décomposer le domaine en un certain nombre de petits éléments est que le problème se transforme d'un petit problème difficile à résoudre en un gros mais relativement facile pour résoudre le problème [6].

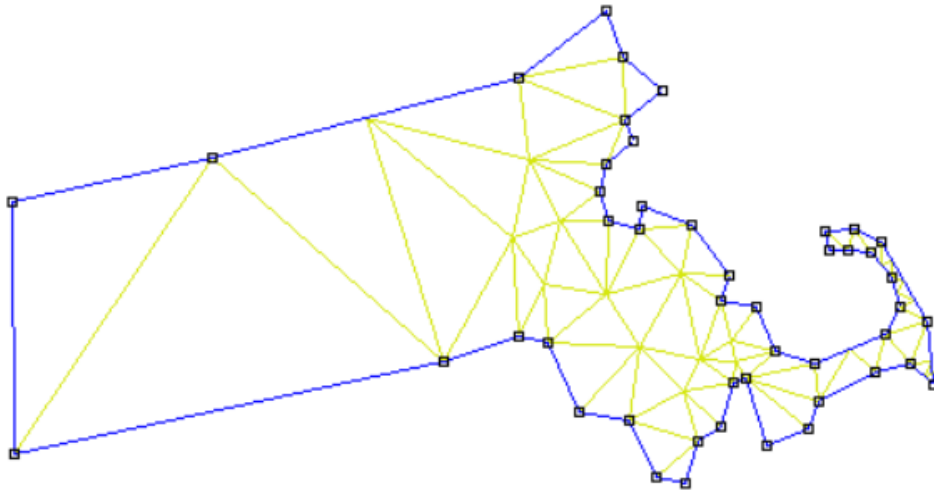


Figure II.4 : triangulation du Massachusetts

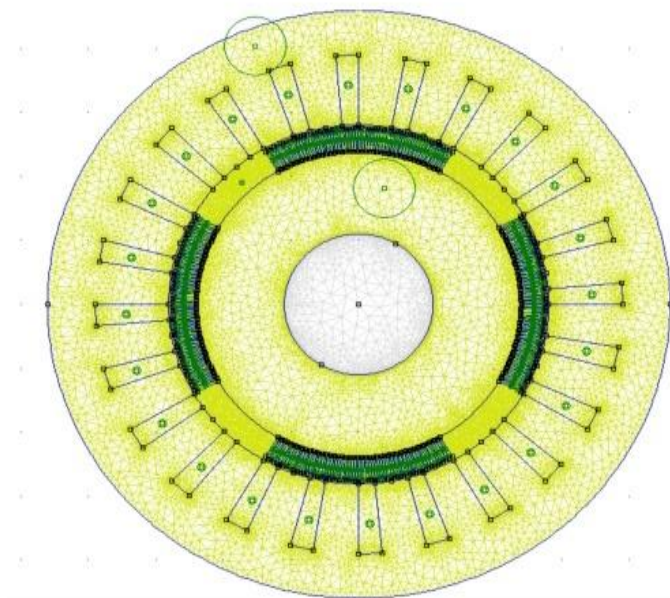


Figure II.5 : Coupe transversale de la machine avec maillage global en 2D.

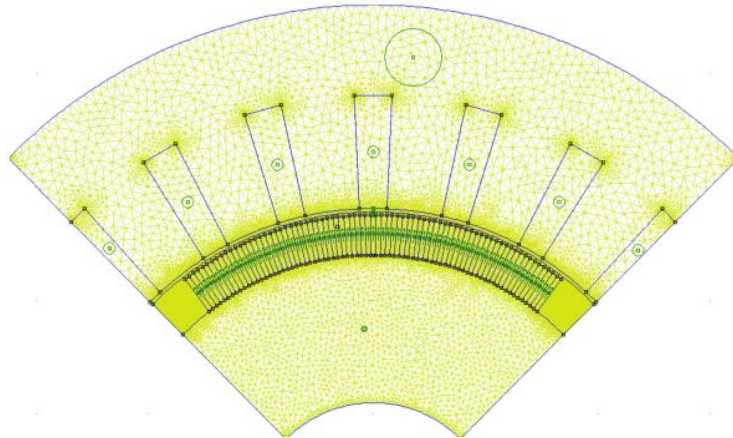


Figure II.6 : Maillage par éléments finis d'un pas polaire.

II.4.3. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis

À grande souplesse d'adaptation de la MEF à modéliser des phénomènes complexes a conduit à la généralisation de son utilisation dans presque tous les problèmes aux dérivées partielles [3]. On peut noter les avantages suivants :

- ❖ Adaptation aux géométries complexes.
- ❖ Prise en compte des non -linéarités.
- ❖ Temps de résolution relativement rentable.

Malgré ça, la mise en œuvre de la MEF est relativement difficile et présente des imprécisions dans ces situations :

- ❖ Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- ❖ Domaine d'étude infini [3].

II.5. Présentation de l'outil de calcul utilisé

Nous avons défini précédemment une méthode théorique de calcul numérique de la machine synchrone à aimants permanents. Nous définissons dès cette partie, l'outil de calcul utilisé lors des différentes simulations dans ce mémoire. Les calculs dans ce mémoire, sont effectués à l'aide d'un logiciel **2D** basé sur la méthode des éléments finis désigné par **FEMM**.

II.6.Description du logiciel FEMM

II.6.1.Introduction

Le logiciel **F.E.M.M** permet de résoudre des problèmes de magnétostatique et d'électromagnétisme. Pour illustrer l'utilisation du logiciel nous étudierons le cas d'une bobine a noyau d'air voir la (figure II.7) [33].

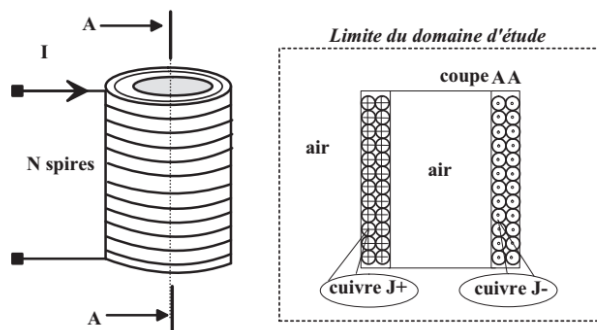


Figure II.7 : Circuit électrique pour la simulation.

Lancer le programme FEMM via l'icône comme indiquée en (Figure II.8) [33].



Figure II.8 : Programme FEMM.

Vous trouverez dans figure la barre de menu principale.

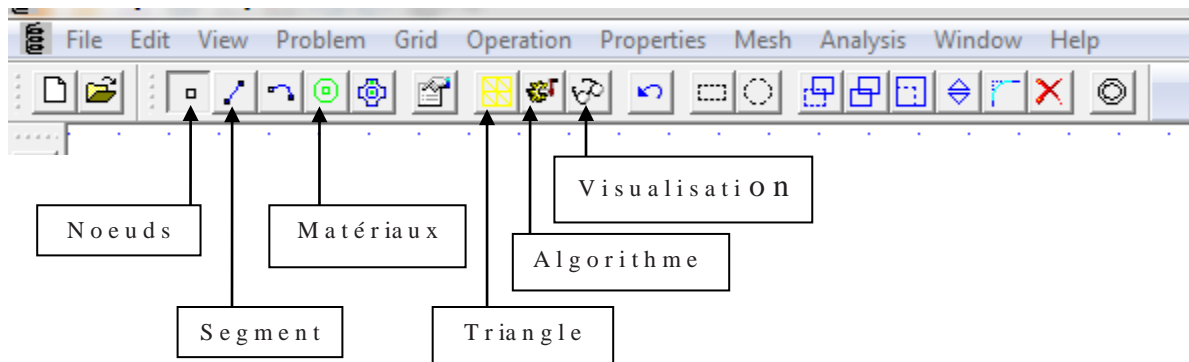


Figure II.9 : Barre de menu principale.

II.6.2 Présentation de logiciel FEMM

FEMM (Finite Element Method Magnetics) est un logiciel 2D basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel est disponible en ligne sous licence GPL à l'adresse : <http://femm.foster-miller.net>.

Ce logiciel est divisé en trois modules :

- ❖ **Le pré processeur** : Permet, à l'aide de techniques issues de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), de décrire la géométrie du domaine, ses propriétés physiques et ses conditions aux limites et de réaliser un découpage de manière automatique ou manuelle avec assistance du programme. Le tracé d'une géométrie donnée se fait en introduisant des points dont les coordonnées sont entrées au clavier et cela se passe après avoir défini le domaine d'étude, puis on définit des lignes (qui peuvent être des segments de droites ou des arcs de courbes) et l'on décrit des régions comme des parties de domaine délimitées par ces lignes. À chaque région est attribué un matériau extrait d'une bibliothèque de matériaux dont dispose le logiciel ou bien introduit, ainsi que la taille du maillage associée. Ensuite, définir le schéma ou les données des sources (courant, densité de courant), les conditions aux limites sur les frontières spécifiques du domaine d'étude. Le domaine ainsi obtenu, constitué d'un certain nombre de milieux différents, est discrétisé en petits éléments par un maillage triangulaire, chaque triangle étant repéré par ses trois sommets. Dans chaque élément, le potentiel vecteur est approché par un polynôme du premier degré [24].
- ❖ **Le Solver** : Tient compte des données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell (résolution de l'équation aux dérivées partielles) pour obtenir, les valeurs du champ magnétique dans l'ensemble du domaine d'étude [28].
- ❖ **Le Post-processeur** : C'est un programme graphique qui permet de visualiser les résultats de calcul des champs obtenus par le Solver sous forme de graphes. Entre autre, il permet de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux. L'interface interactive du post-processeur peut fonctionner dans trois modes différents :

En mode point, l'utilisateur peut inspecter les valeurs du champ dans n'importe quel point du domaine étudié. En mode contour, l'utilisateur peut relever et tracer le long d'un contour prédéterminé diverses grandeurs du champ telles que le potentiel vecteur, les composantes normales et tangentielles de l'induction magnétique et du champ magnétique, le flux, et déterminer l'effort produit ou le couple engendré...etc. Le mode bloc permet à l'utilisateur de définir un sous-domaine dans une région, dont la solution est une quantité d'intégrales de surface ou de volume. Ces intégrales incluent l'énergie magnétique, la coénergie magnétique, l'inductance, les différents types de pertes, le courant total et le couple. Par ailleurs, le compilateur Lua a été intégré dans le logiciel **FEMM** pour permettre à l'utilisateur de créer des programmes, écrits en langage Lua, facilitant la construction et l'analyse des géométries ainsi que l'évaluation des résultats du post-processeur [24].

CHAPITRE III
DIMENSIONNEMENT
D'UNE MACHINE
SYNCHRONNE A AIMANTS
ENTERRES
MULTICOUCHE

Chapitre III : Dimensionnement d'une machine synchrone à aimants enterrés multicouche

III.1. Introduction

Le dimensionnement de la machine permettant de définir les caractéristiques dimensions de la machine afin de répondre a des besoins bien spécifiques. Ces besoins sont souvent formules dans un cahier des charges qui définit les performances attendues de la machine et les nombreuses contraintes qu'elle doit satisfaire.

Outre le développement de matériaux à aimants permanents et d'électronique de puissance, les machines a aimant permanent ont été largement utilisées dans divers domaines, tels que la défense de l'armée, les moteurs industriels, les appareils ménagers, etc. Les machines IPM montrent une application prometteuse dans le système d'entraînement électrique.

Dans ce chapitre, nous exposons une simulation au niveau de la machine synchrone à aimants enterrés pour l'objective de calculer l'induction radial et tangentielle et le couple de détente de chaque couche d'aimant, en utilisant le logiciel FEMM.

III.2. Présentation de la structure de machine étudiée

La structure du rotor de la machine à aimants permanents enterrés est robuste et une saillance élevée, et peut produire un couple de réticence et atteindre une densité de puissance élevée et une large plage de vitesse. Dans la machine à aimants permanents intérieur. La machine synchrone à aimants permanents étudiée, comme cela a été indiqué dans la (figure III.1), est à entrefer lisse. Elle est constituée d'un stator classique denté avec des encoches a géométrie simple abritant le bobinage triphasé alimenté par une source adaptée à la forme d'onde du flux dans l'entrefer et donc à celle de la force électromotrice générée. Les aimants dans cette machine sont montés à l'intérieur du rotor. En raison de la structure complexe du rotor et de la saturation non linéaire des ponts de rotor, il est difficile de construire un modèle de calcul de champ analytique pour les machines à aimants permanents intérieurs (IPM) multicouches.

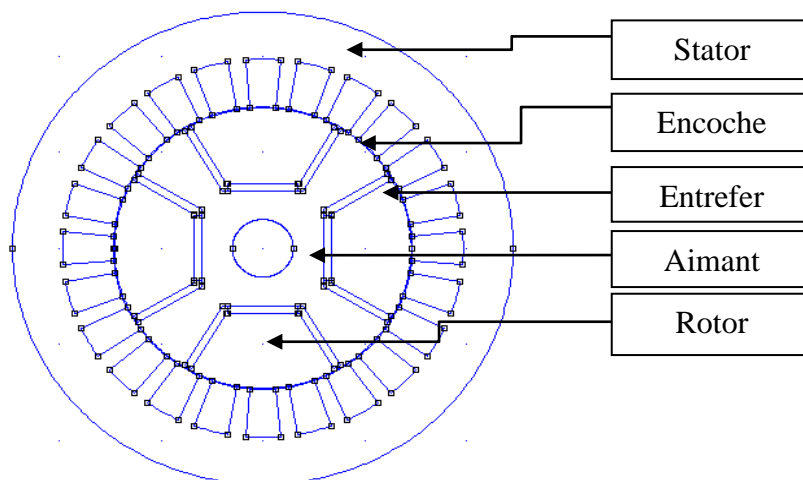


Figure III.1 : Structure de machine étudiée.

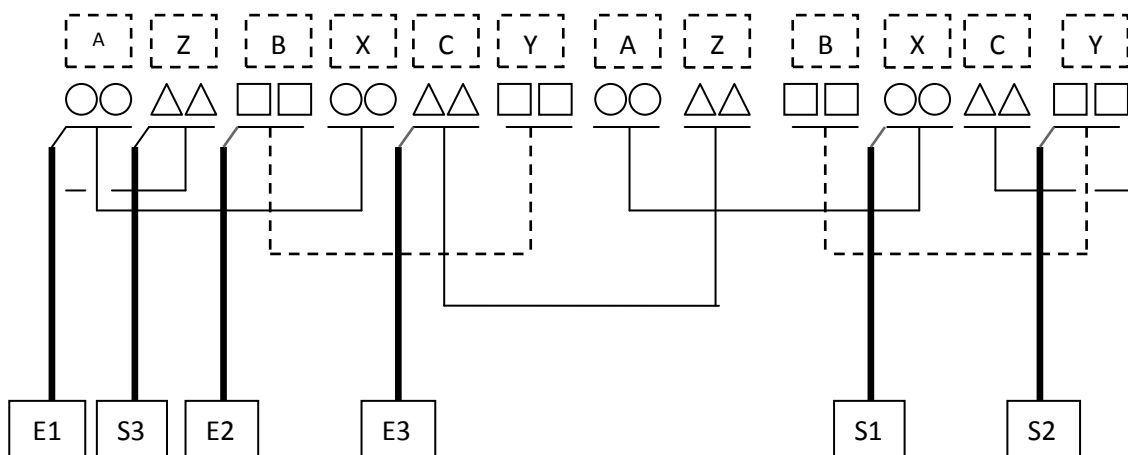


Figure III.2 : Représentation de l'enroulement statorique.

Avec :

E : entré.

S : sortie.

III.2.1 Paramètres de la machine

Les principales caractéristiques de la machine étudiée sont indiquées dans le (Tableau III.1).

Tableau III.1 paramètre de la machine étudiée

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Nombre de pole	$2p$	4	-
Nombre d'encoche	Q_s	24	-
Nombre de spire	N_s	100	Spire
Rayon extérieur du stator	R_1	247	<i>Mm</i>
Rayon intérieur du stator	R_2	147	<i>Mm</i>
Rayon extérieur du rotor	R_3	146	<i>Mm</i>
Rayon intérieur du rotor	R_4	30	<i>Mm</i>
L'épaisseur de l'entrefer	g	1	<i>Mm</i>
Hauteur de l'encoche	h_0	50	<i>Mm</i>
Ouverture de l'encoche	b_0	10	<i>Degré</i>

III.3. Structure de la machine étudiée des différentes couches

III.3.1 Première couche

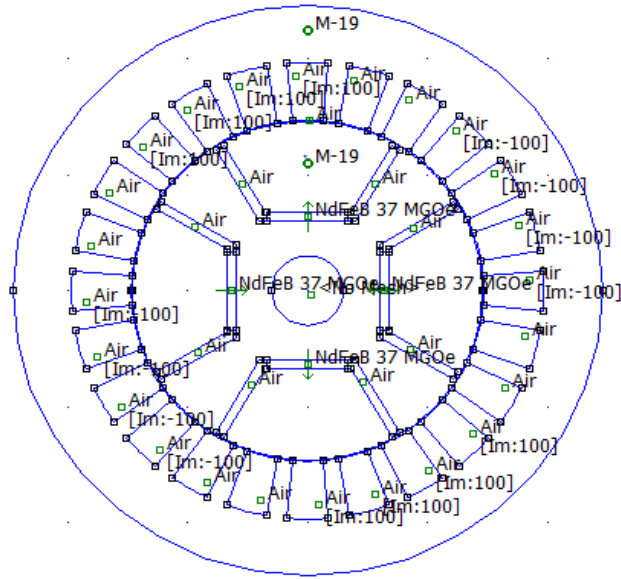


Figure III.3 : Structure d'une machine à une couche d'aimant.

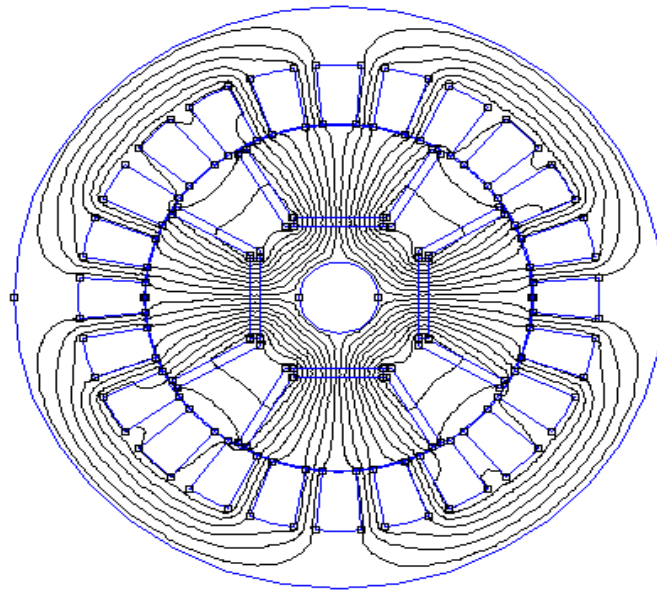


Figure III.4 : Lignes de champ d'une machine à une couche d'aimant.

III.3.2 deuxième couche

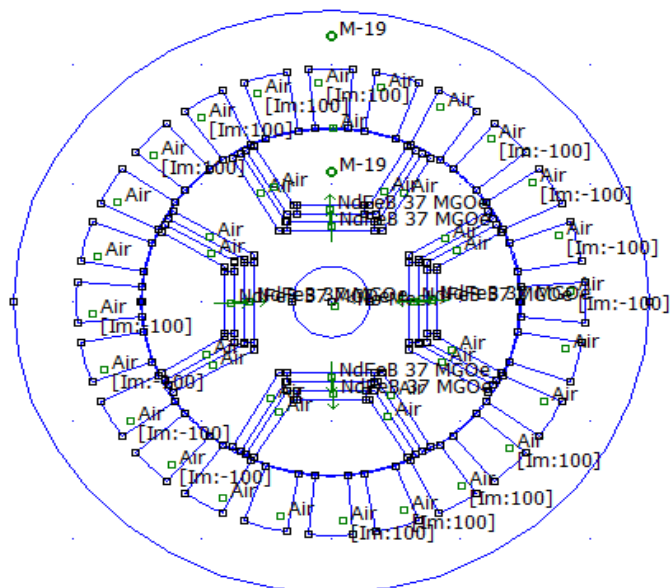


Figure III.5 : Structure d'une machine à deux couches d'aimant.

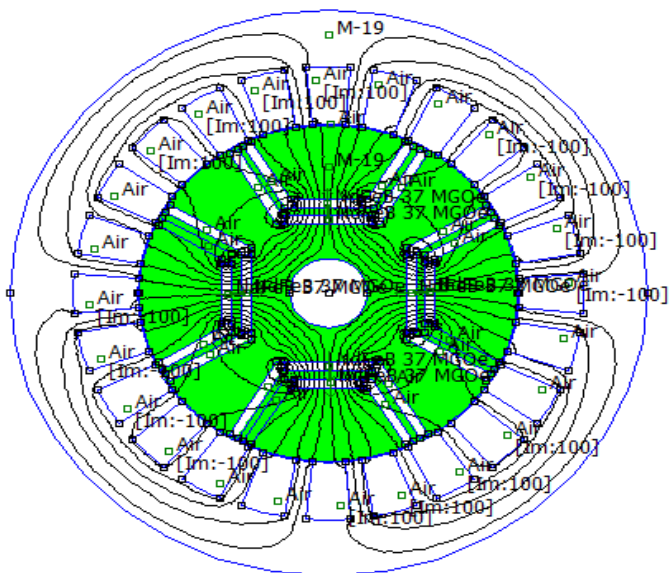


Figure III.6 : Lignes de champ d'une machine à deux couches d'aimant.

III.3.2 troisième couche

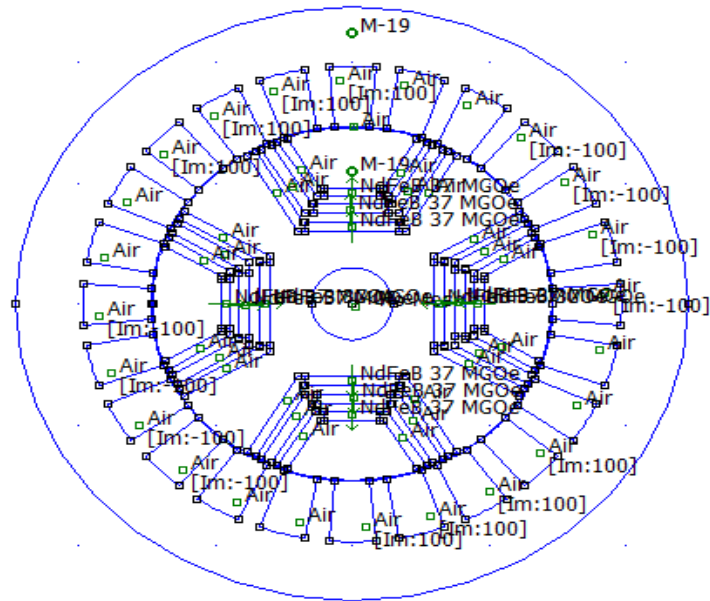


Figure III.7 : Structure d'une machine à trois couches d'aimant.

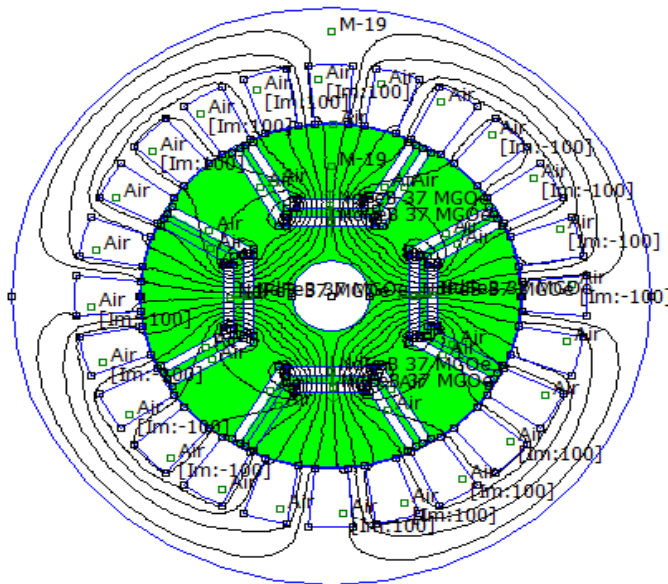


Figure III.8 : Lignes de champ d'une machine à trois couches d'aimant.

III.4. Résultats de simulations

III.4.1. A vide

III.4.1.1. Induction radiale

❖ Une couche d'aimant

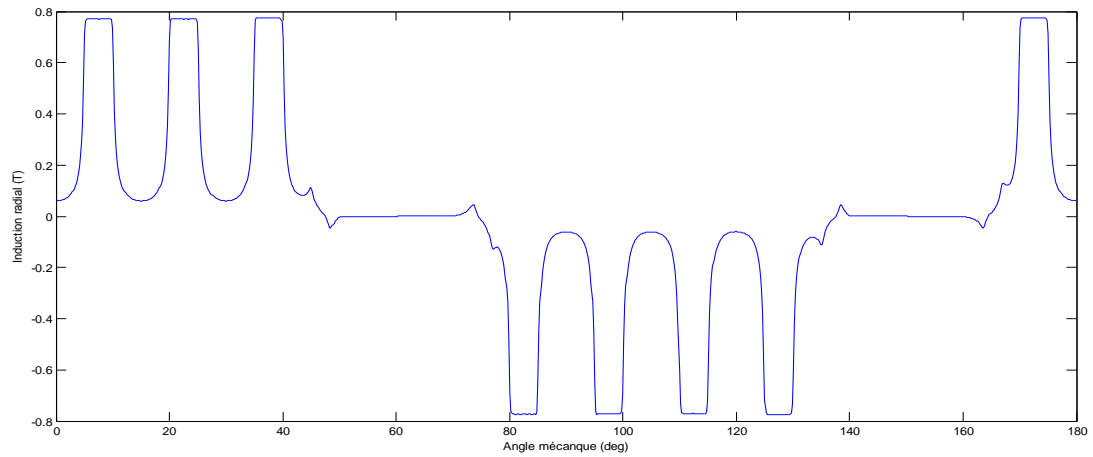


Figure III.9 : Induction radiale d'une couche d'aimant à vide.

❖ Deux couches d'aimant

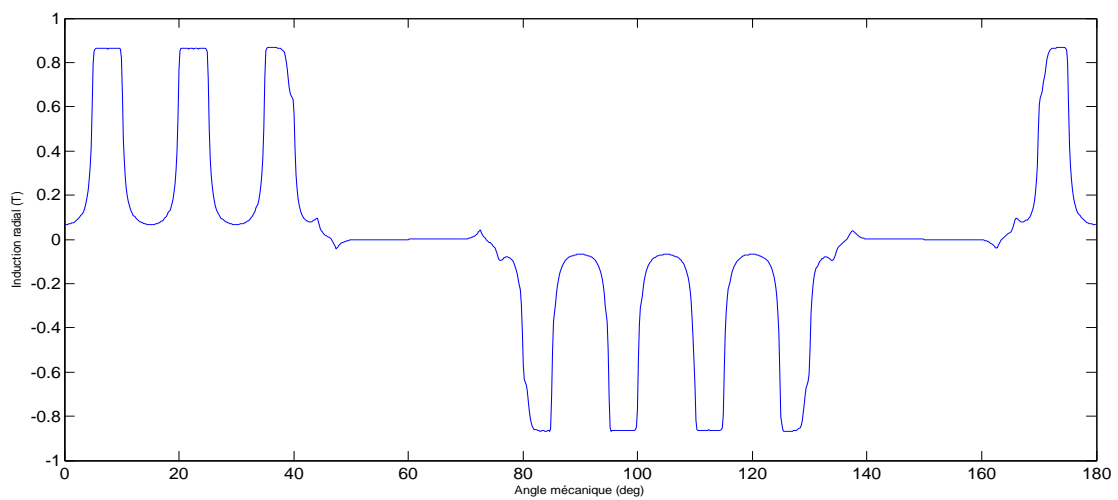


Figure III.10 : Induction radiale de deux couches d'aimant à vide.

❖ Trois couches d'aimant

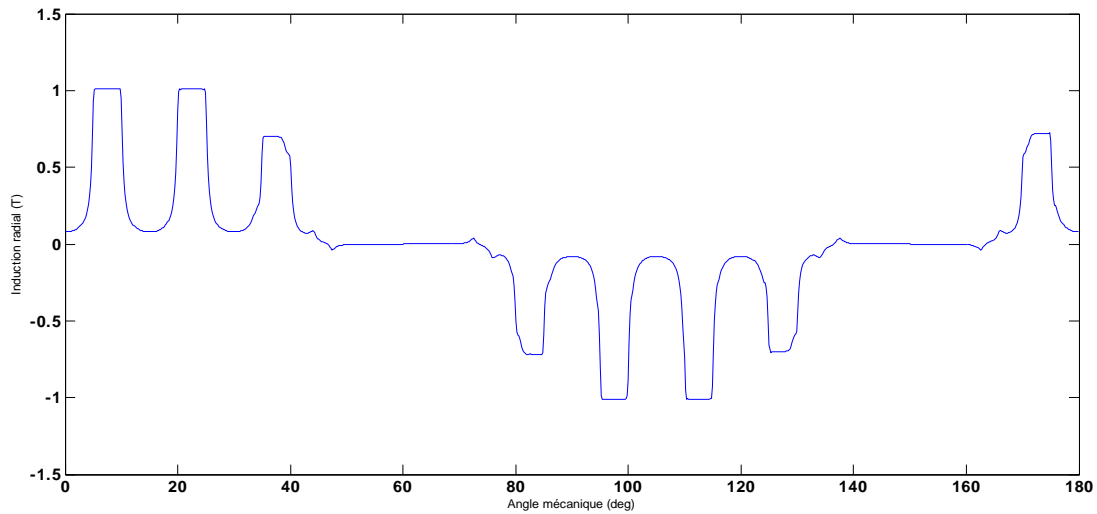


Figure III.11 : Induction radiale de trois couches d'aimant à vide.

Commentaire :

Les figures précédentes représentent les inductions radiales de la machine synchrone à aimant enterrée à vide, Nous avons remarqué que signale est augmente après d'ajoute chaque couche ce qui créant des harmonique.

III.4.1.2. Induction tangentielle

❖ Une couche d'aimant

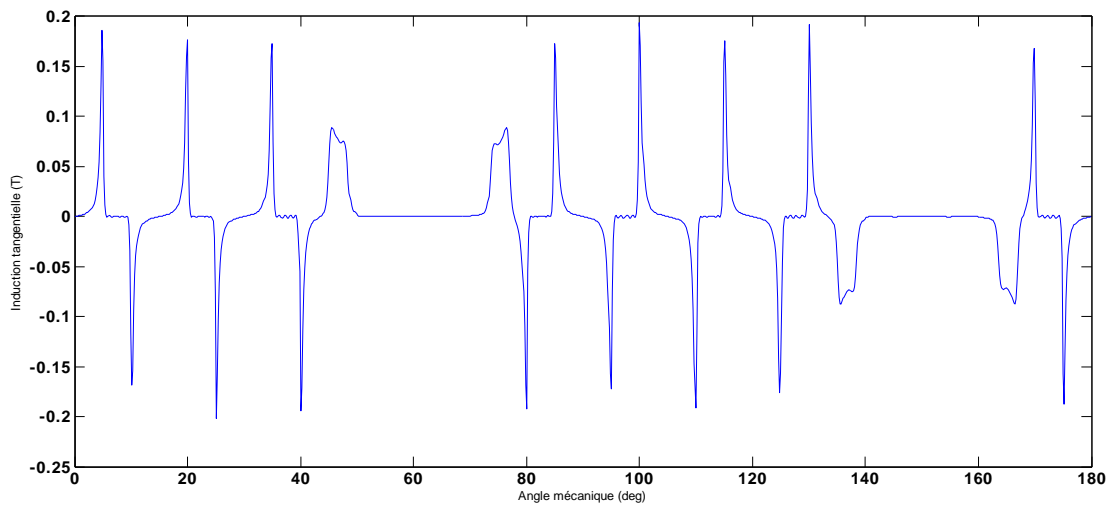


Figure III.12 : Induction tangentielle d'une couche d'aimanta vide.

❖ Deux couches d'aimant

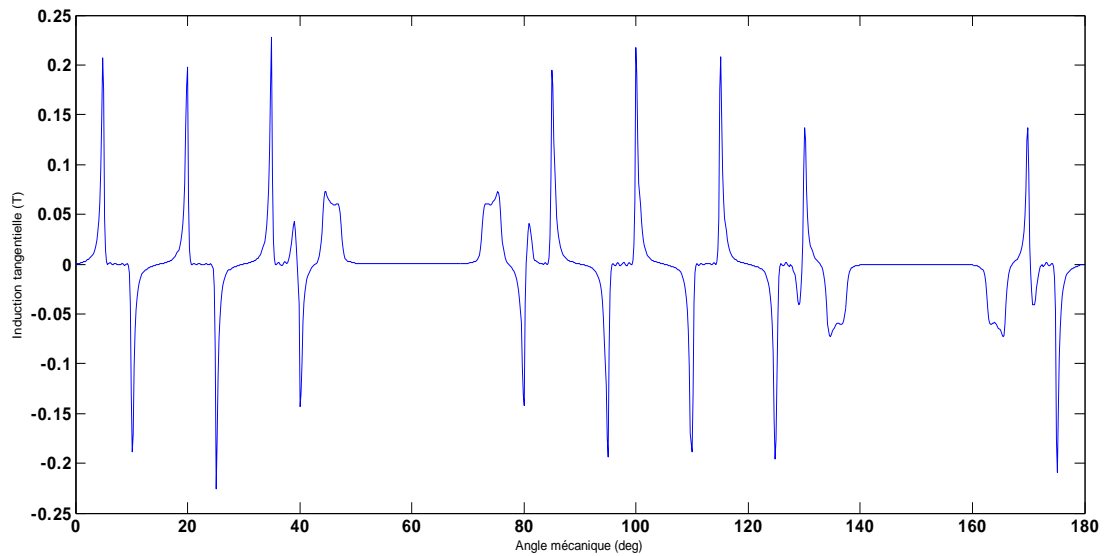


Figure III.13 : Induction tangentielle de deux couches d'aimanta vide.

❖ Trois couches d'aimant

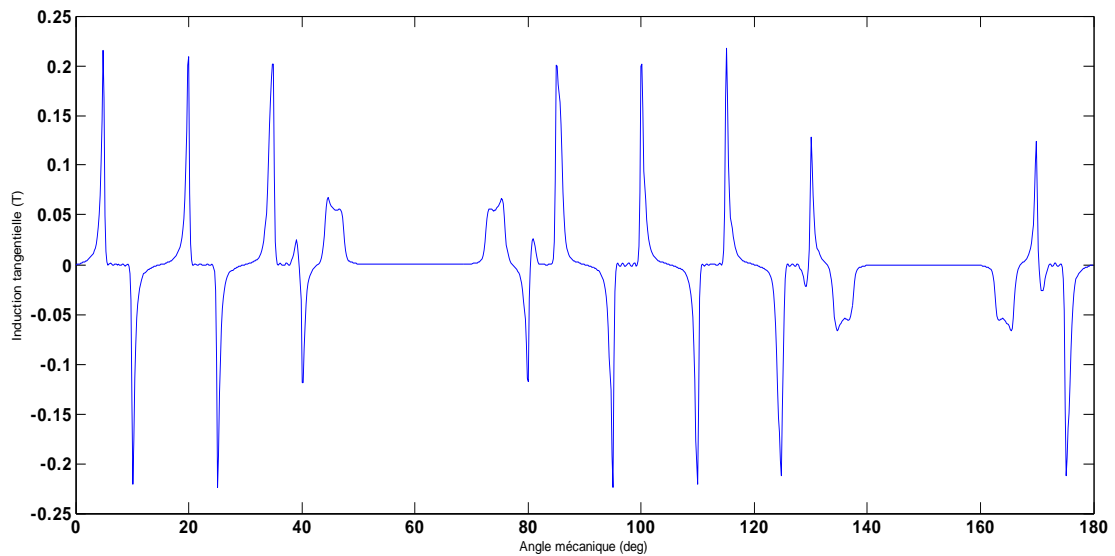


Figure III.14 : Induction tangentielle de trois couches d'aimant à vide.

Commentaire :

Les figures précédentes représentent les inductions tangentielles de la machine synchrone à aimant enterrée à vide, Nous avons remarqué des pics augmente après ajouter chaque couche ce qui créant des harmoniques.

III.4.2.En charge

III.4.2.1.Induction radiale

❖ Une couche d'aimant

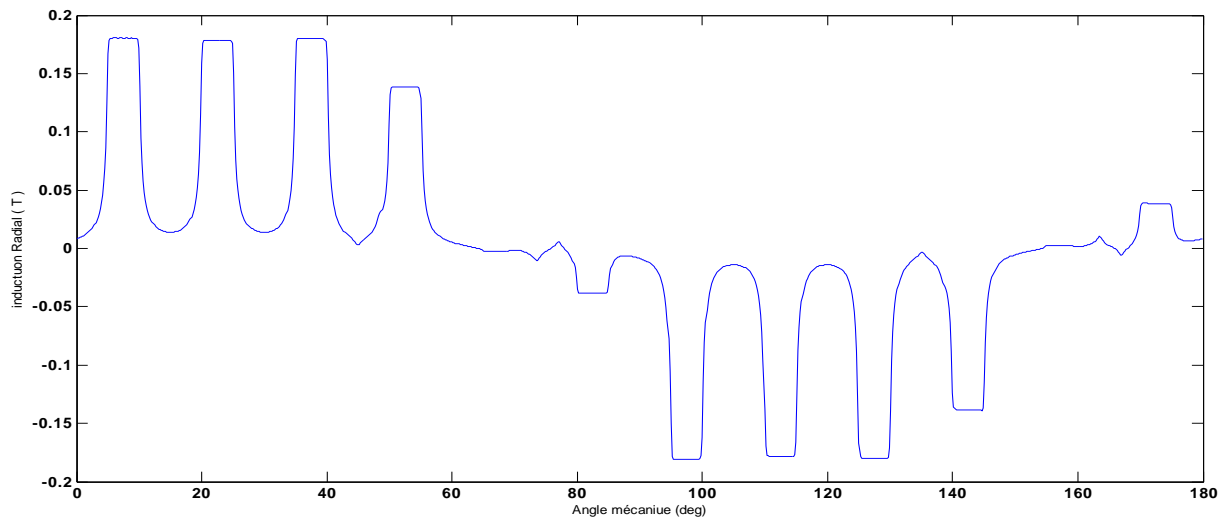


Figure III.15 : Induction radial d'une couche d'aimant en charge.

❖ Deux couches d'aimant

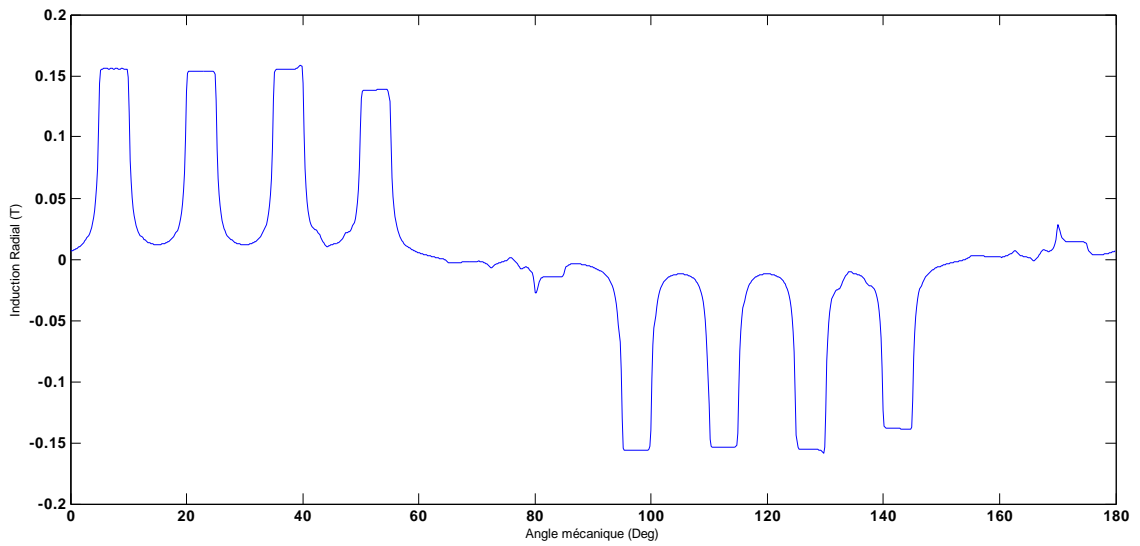


Figure III.16 : Induction radial de deux couches d'aimant en charge.

❖ Trois couches d'aimant

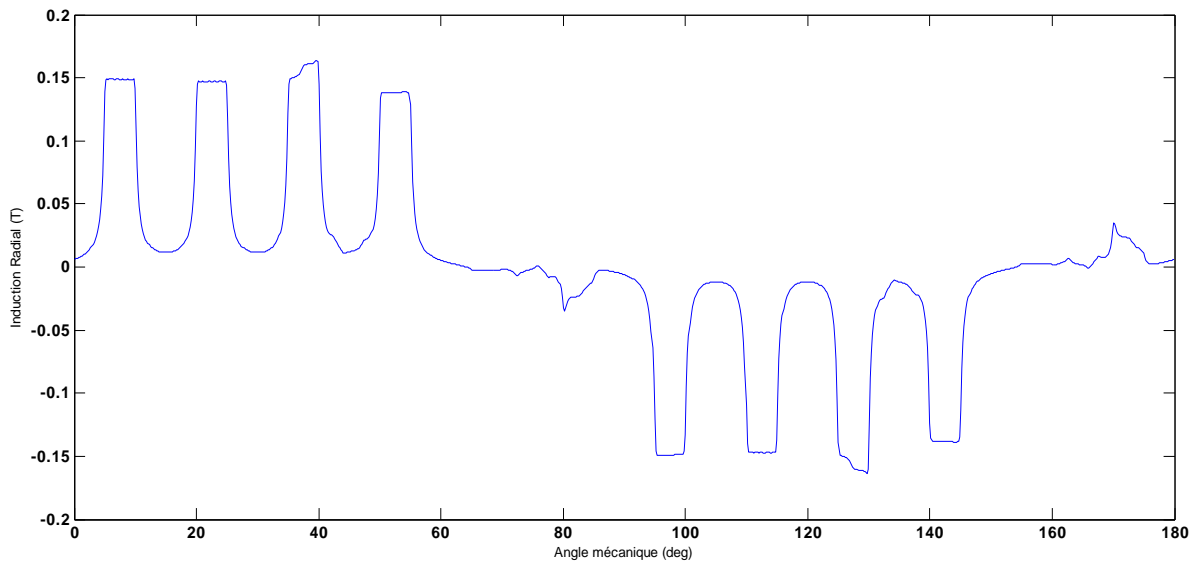


Figure III.17 : Induction radiale de trois couches d'aimant en charge.

Commentaire :

Après avoir les résultats de simulation de la MSAP a aimant enterrée en charge nous avons remarque que l'amplitude diminuée après d'ajoute chaque couche que indique une diminution des harmoniques.

III.4.2.2. Induction tangentielle

❖ Une couche d'aimant

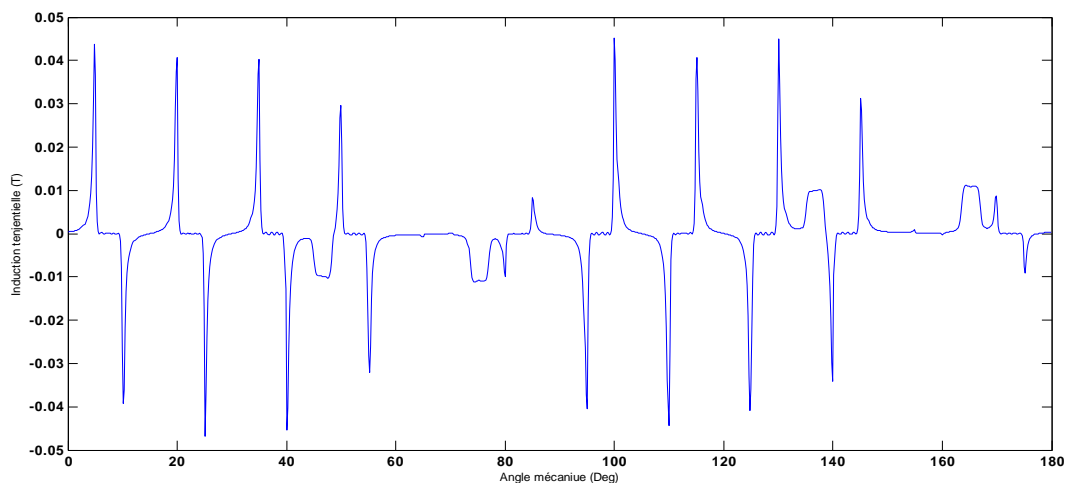


Figure III.18 : Induction tangentielle d'une couche d'aimant en charge.

❖ Deux couches d'aimant

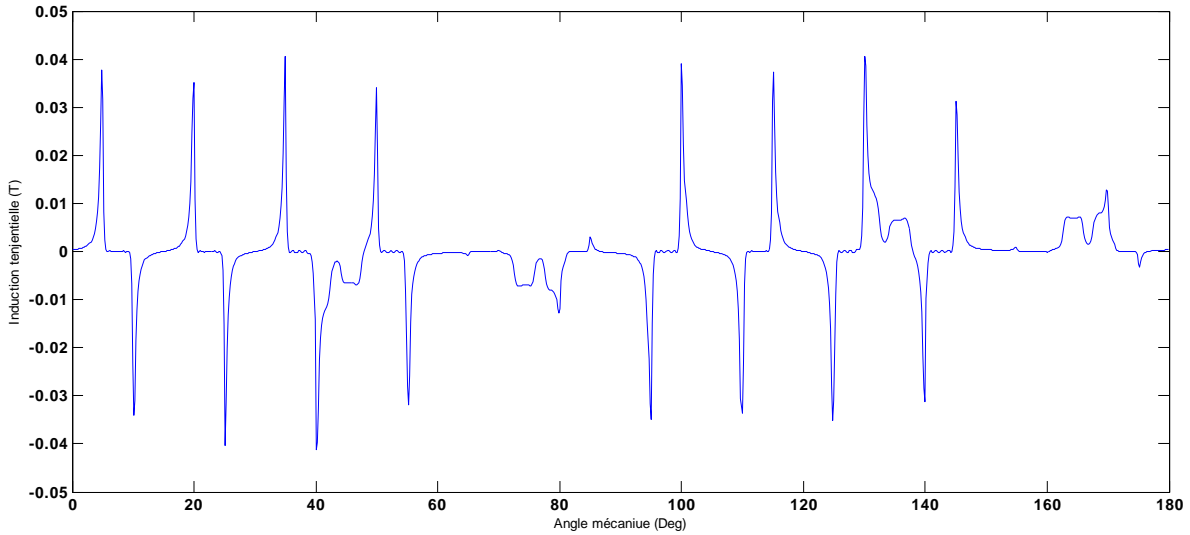


Figure III.19 : Induction tangentielle de deux couches d'aimant en charge.

❖ Trois couches d'aimant

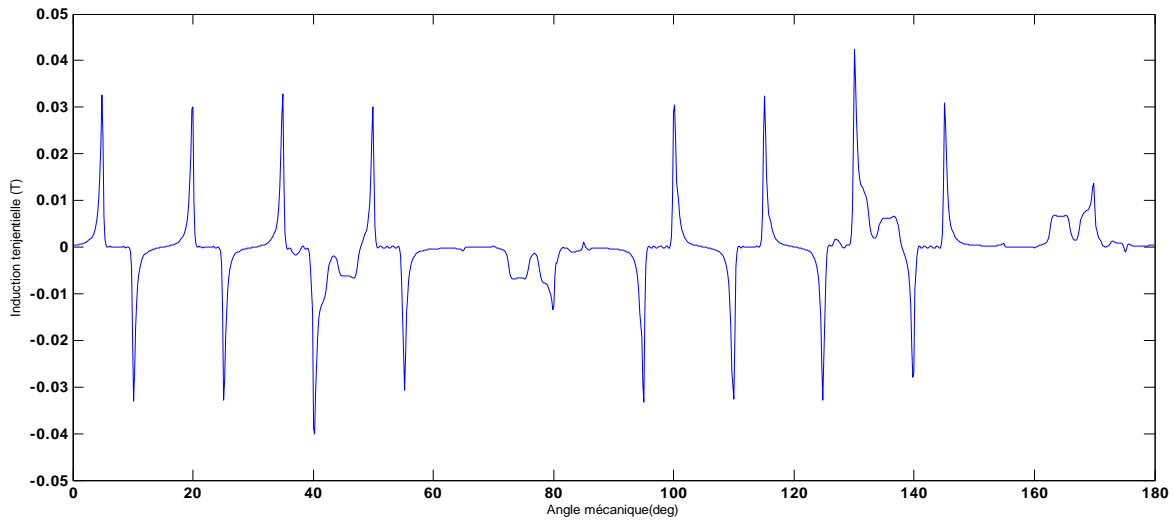


Figure III.20 : Induction tangentielle de trois couches d'aimant en charge.

Commentaire :

Après avoir les résultats de simulation de la MSAP a aimant enterrée en charge nous avons remarque que le composant tangentielle diminuée après d'ajoute chaque couche que indique une diminution des harmoniques.

III.4.3. Le couple

III.4.3.1. Couple de détente

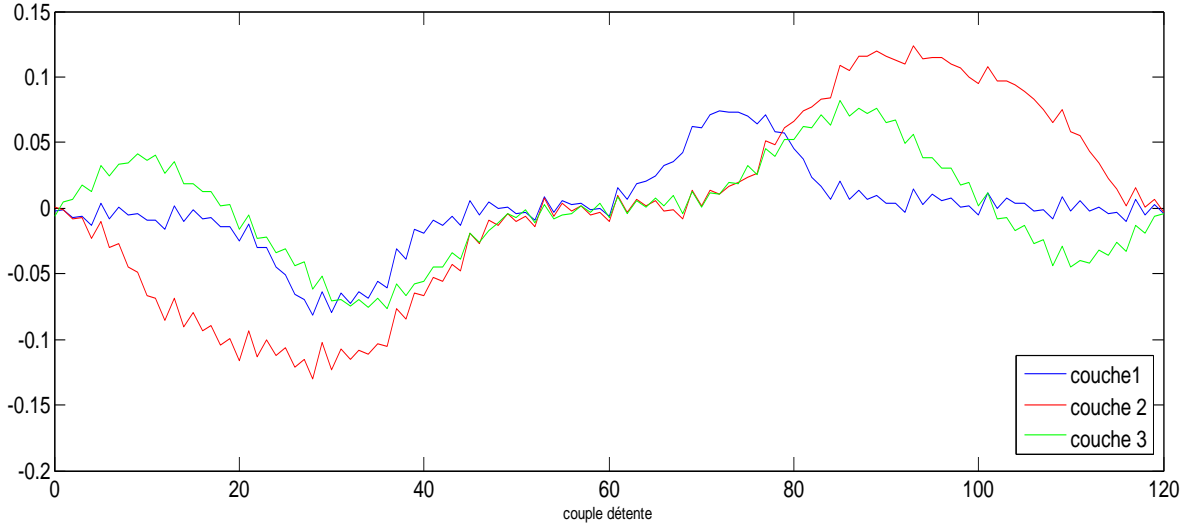


Figure III.21 : Couple de détente des différentes couches d'aimant.

Commentaire :

La figure ci-dessus présente le couple de détente de la MSAP à aimant enterrée, nous avons observé que la MSAP à trois couches de grande amplitude par rapport autre machine.

III.4.3.1. Couple reluctance

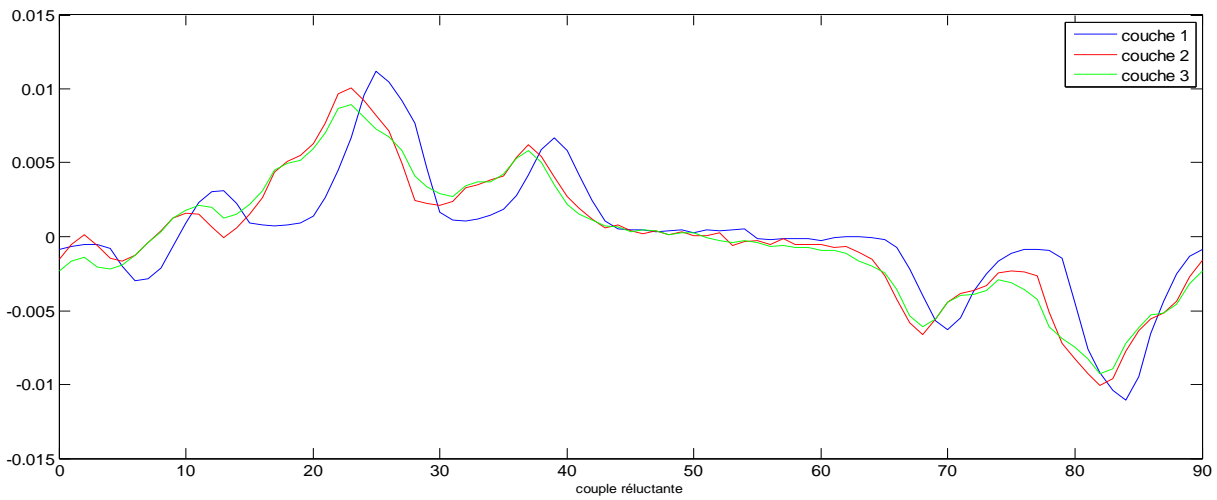


Figure III.22 : Couple de reluctance des différentes couches d'aimant.

Commentaire :

La figure ci-dessus présente le couple de reluctance de la MSAP a aimant enterrée, nous avons observé que la MSAP à une couche de grande amplitude par rapport autre machine.

III.5 Conclusion

Au niveau de ce chapitre, nous avons représenté les différentes couches de la machine proposée. Les différents résultats de simulation de cette machine étudiée ont été visés au niveau de l'entrefer comme les inductions radial et tangentiel ainsi que les différents couples.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce manuscrit, il a été nécessaire de réaliser une étude générale sur la machine synchrone à aimants permanents. Dans le premier chapitre, les différentes structures ont été particulièrement abordées au niveau du que ce soit à flux radial ou à flux axial.

Les matériaux sont généralement séparés en deux classes : les matériaux doux et les matériaux durs (aimants permanents). Les aimant permanent conservent leur état d'aimantation initial même lors de l'application d'un champ magnétique relativement élevé, Mais son aimantation diminue selon loi logarithmique en fonction du temps, ils sont utilisés comme sources de champ magnétique dans les machines électriques. La MSAP est la structure la plus exploitée malgré une fluctuation importante des prix des aimants permanents, le coût des aimants est un critère très important dans le choix de la motorisation pour les applications de cette machine. Un haut rendement, une bonne compacité, un couple élevé, de bonnes conditions de transfert thermique et un contrôle relativement simple sont les avantages de la MSAP.

Nous sommes intéressés à la modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents dans le second chapitre, en se basant sur les équations de Maxwell qui offrent la base mathématique pour l'analyse rigoureuse des problèmes électromagnétiques, il existe d'autres méthodes de modélisation comme la méthode semi-analytique et la méthode numérique.

La méthode des éléments finis a été appliquée avec succès pour résoudre les problèmes électromagnétiques, elle est pratiquement la plus adaptée et la plus utilisée pour ce genre de problèmes puisqu'elle s'adapte aux formes complexes des sections étudiées.

Le logiciel FEMM est l'outil de calcul utilisé dans ce travail, ce logiciel utilise le langage LUA pour la résolution des problèmes électromagnétiques.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté le dimensionnement de la machine synchrone à aimants enterrés multicouche. Nous avons dimensionné nos machines en jouant sur les couches de l'aimant, nous avons fait plusieurs tests de simulation sur chaque couche d'aimant dont l'objectif est d'obtenir les inductions radiales, tangentielles et les différents couples.

Bibliographies

[1] : MAAROUK Abdelatif. « Commande dynamique d'une machine synchrone a aimants permanents alimentée en tension » thèse de master, Univ de Boumerdes, Juin 2016.

[2] : LAHCENE BELLAHCENE, MOHAMED DJAOUANI. « Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone a aimants permanents dotée d'un observateur MRAS » thèse de master, Univ Tlemcen, juillet 2017.

[3] : Sonia MOUZAOUI. « Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de Défauts de Courts-Circuits et de Désaimantations par la Méthode des Eléments Finis » thèse de master, Univ TIZI-OUZOU, septembre 2015.

[4] : LADGHEM CHIKOUCHE Brahim.« Calcul des performances de la machine synchrone a aimant permanents » thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, juillet 2009.

[5] : Benjamin Daguse. « Modélisation analytique pour le dimensionnement par optimisation d'une machine dédiée à une chaîne de traction hybride à dominante électrique » thèse de Doctorat, Mar 2014

[6] :Help de logiciel FEMM.

[7] : K. Malick Cissé « Etat de l'art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides» JUILLET 2018, NANCY, FRANCE.

[8] : SENHADJI Nawel. CHALABI Ammaria «commande du moteur synchrone a aimants permanents par backstepping » thèse de master, Univ Tlemcen, juin 2015.

[9]:M. MABRAK Samir. M. MAY Abdelmalek « Calcul analytique et numérique des machines synchrones à aimants permanents montés sur la surface rotorique » thèse d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Univ ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, Juin 2008

[10] : Hamichi Azedine. Benkerrou Farid « Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent » thèse de master, Univ Bejaia, 2015

[11] : Rachid ABDESSEMED, "Les enroulements des machines électriques", Université de Batna, iPress 1995

[12] : Husseïn DOGAN « Méthodologie de Conception des Machines Synchrones à Aimants Permanents – Application au Véhicule Electrique avec Chargeur Rapide Embarqué – » thèse de Doctorat, Univ GRENOBLE, juillet 2013.

[13] : Annane Adel « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable » thèse de Magister, Univ d'Annaba, 2010.

Bibliographie

[14] :Noureddine BOUNASLA « Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents » thèse de Magister, Univ Sétif, 2014.

[15] : Sahli Arab. Ourari Loucif «réglage et contrôle de la vitesse de la machine synchrone a aimant permanent » thèse de Master, Univ Bejaia, 2015.

[16] : Boumedyen Nedjar.«Modélisation basée sur la méthode des réseaux de perméances en vue de l'optimisation de machines synchrones à simple et à double excitation» thèse de Doctorat, École normale supérieure de Cachan, Mar 2012.

[17] :BEKKOUCHE Hamza, ACHOUR Oualid. « Calcul des Performances des Machines Synchrones à Aimants Permanents Montés sur la Surface Rotorique non Magnétique » thèse de MASTER, Univ M'sils, 2019.

[18] : ROBAI Toufik. BENSALAH Ahmed Rafiq « Contribution à l'Etude d'un Moteur Synchrone à Aimant Monté Sur la Surface Rotorique» thèse de Master, Univ M'SILA, Mai 2017.

[19] : Milind Paradkar. «2D analytical model for estimation of eddy current loss in the magnets of IPM machines considering the reaction field of the induced eddy currents » IEEE, 2015.

[20] : LADGHEM CHIKOUCHE Brahim « Pré-dimensionnement de machines synchrones a entrefer lisse et a aimants permanents montes sur la surface rotorique » thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, octobre 2018.

[21] :M. Al-ani, H. Mahmoud, M. Degano and C. Gerada« Double Rotor Synchronous Reluctance Machine: Analysis towards Torque Capability » IEEE, 2018.

[22] : Liu Qinghua, A. Jabbar, A. M. Khambadkone« Design Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide-Speed Operation»IEEE,2001.

[23] : Armando Fonseca « Comparaison de machines à aimants permanents pour la traction de véhicules électriques et hybrides » thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, avril 2012.

[24] : GUERROUDJ Cherif « étude et conception d'une machine a aimants permanents à double saillance (dspm) pour des applications a basse vitesse de rotation » thèse de Magister, Univ Bejaia, juillet 2012.

[25] : Sara BAZHAR « modélisation, optimisation en vue du dimensionnement d'une nouvelle structure de démarreurs a griffes pour les véhicules « micro-hybrides » » thèse de Doctorat, juillet 2017.

- [26] : GUILLAUME PONGO NYOUMEA « modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimants permanents » thèse de Doctorat, Univ du Québec, Avril 2018.
- [27] :Marco Zimmermann, Lino Schupp and Bernhard Piepenbreier, *Senior Member* «Operating Strategy and Iron Loss Model of a Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Machine with a Ribless Rotor »IEEE ,October 2018.
- [28] : AROUNE NABILA. « Simulation d'une machine a inversion de flux basée sur l'environnement matlab/simulink » thèse de Magister, Univ de Bejaia, janvier 2016.
- [29] : AIT AMARA Nassim « Etude Comparative des Machines Synchrones Excitées par Aimants et courants électriques » thèse de Master, Univ Bejaia, 2014.
- [30] : Aimeur Amar. Bennouioua Hadj « Dimensionnement optimal d'une machine synchrone a aimants permanents à double excitation » thèse de Master, Univ M'sila, 2018.
- [31] : Saeed Afsharnia «Contrôle vectoriel des machines synchrones à aimants permanents : identification des paramètres et minimisation des ondulations de couple » thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Mar 2018.
- [32] : Kamel BOUGHRARA « Modélisation Analytique et Numérique des Performances Electromagnétiques des Moteurs Synchrones à Aimants Permanents » thèse de Doctorat, L'Ecole Nationale Polytechnique, décembre 2008.
- [33] : David Meeker « Notice d'utilisation du logiciel Finite Element Method Magnetics » De Carvalho Adelino, *adelino.decarvalho@iutc.u-cergy.fr*, septembre 2005.
- [34] : Adel Azzedine Bettayeb «Pertes à haute fréquence dans les rotors des machines synchrones à aimants alimentées par onduleur de tension » thèse de Doctorat, Mars 2013.
- [35] : Chibani Aziz « étude pour la conception d'une machine synchrone a rotor externe » thèse de Magister, Univ de Batna, novembre 2011.
- [36] : Vasile MIHAILA « Nouvelle conception des bobinages statoriques des machines à courant alternatif pour réduire les effets négatifs des dV/dt » thèse de Doctorat, Univ d'Artois, décembre 2011.