

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique Université

A.MIRA-BEJAIA



DÉPARTEMENT DE GÉNIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en
Électrotechnique

Option : Machines électriques

Thème:

Étude et Analyse par la Méthode des Éléments Finis d'une
Machine Synchrone à Aimants Permanents Enterrées

Présenté par:
Hassaim Messipsa
Boukasmi Adel

Encadré par:
Pr Rachid SAOU

Année Universitaire:2023/2024

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier le bon dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et le courage pour finir ce travail.

Nous souhaitons exprimer nos reconnaissances qui sont innombrables

Cependant, ne pouvant pas dresser la liste exhaustive de tout le monde, dans la crainte d'oublier quelqu'un.

Nous commencerons volontiers par rendre hommage à toutes celles et à tous ceux sans exception, qui ont contribué de près ou de loin à favoriser ce travail.

Nous exprimons notre gratitude et tout notre respect à notre promoteur Mr Rachid Saou de nous avoir suivis tout au long de notre travail.

Nous remercions vivement le jury d'avoir accepté de juger et de valoriser notre travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très cher parents, ma mère qui m'a encouragé et priée durant toute sa vie pour que je puisse réussir, et à mon père qui est toujours prêt à tout donné afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A mes frères et mes sœurs et toute ma famille.

A tous mes amis, AHCEN, Bachir, Syphax, Khelifa, Nassim, balaid, abdou, salas, Sofiane, Azdine, A.Walid , C. Walid , Tarik et particulièrement S.Said.

B. Adel

Dédicace

Je dédie ce travail à ma chère mère et mon cher père pour leurs encouragements et soutien tout le long de ma vie sans eux je ne serais pas arriver ou je suis aujourd'hui

Et à mon grand frère et sa femme et leur petit tayeb, et a mon petit frère

Et a tout ma famille cousin et cousine

Et ainsi a tout mes amis et toute personne ayant contribué a la réussite de ce travail.

Messipsa

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les Machines synchrones à aimants permanents (MSAP)	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de la machine synchrone	3
I.3 Constitution de la machine synchrone	4
I.3.1 Le Stator.....	4
I.3.2 Le Rotor.....	4
I.3.3 L'arbre.....	4
I.3.4 Les balais.....	4
I.3.5 Les paliers	4
I.3.6 Les flasques.....	4
I.3.7 Les portes balais	5
I.3.8 Les bagues collectrices	5
I.3.9 La carcasse.....	5
I.3.10 La boîte à bornes	5
I.4 Classification des machines synchrones	5
I.4.1 Machines synchrones à pôles lisses	5
I.4.2 Machines synchrones à pôles saillants.....	6
I.4.3 Machines synchrones à aimant permanent (MSAP)	6
I.5 Configurations des MS à aimants permanents (MSAP)	6
I.5.1 MSAP à Aimants montés en surface.....	7
I.5.2 MSAP à Aimants insérés	8
I.5.3 MSAP à Aimants à concentration de flux	9
I.5.4 MSAP à Aimants enterrés.....	9
I.6 Principe de fonctionnement de la MSAP.....	13
I.6.1 Fonctionnement en mode moteur	13
I.6.2 Fonctionnement en mode génératrice.....	13
I.7 Les différents couples de la MSAP.....	13
I.7.1 Couple réductant	13
I.7.2 Couple de détente	13
I.7.3 Couple Électromagnétique	14
I.8 Définition d'un aimant permanent	14

I.9	Les aimants permanents et leurs caractéristiques	14
I.10	Différent types d'aimants permanents utilisés dans les MSAP	15
I.10.1	Les aimants métalliques	15
I.10.2	Les ferrites	15
I.10.3	Terre rares	16
I.11	Avantages des MSAP	19
I.12	Inconvénient des MSAP	19
I.13	Domaine d'application.....	19
I.14	Conclusion	20
CHAPITRE II : MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE LA MSAPE ET PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS		21
II.1	Introduction.....	21
II.2	Equations du champ électromagnétique	21
II.3	Les relations constitutives du milieu	22
II.4	Loi d'Ohm	22
II.5	Passage des champs aux potentiels.....	23
II.6	Condition aux limites (condition de passages)	23
II.6.1	Condition de Dirichlet.....	23
II.6.2	Condition de Neumann	24
II.6.3	Condition de passage.....	24
II.7	Principe de la méthode des éléments finis	25
II.8	Description de logiciel FEMM	25
II.8.1	Shell interactif.....	25
II.8.2	Triangle	25
II.8.3	Solveur.....	26
II.9	Présentation de la machine d'étude	26
II.9.1	Dimensions de la machine.....	27
II.9.2	Disposition des aimants du rotor.....	28
II.9.3	Dimension de l'encoche	28
II.10	Structures de la machine étudiée avec différents niveaux et dispositions de couches d'aimants	29
II.10.1	Présentation des machines MSAPE 1, MSAP 2, MSAP 3.....	30
II.10.2	Présentation machines MSAPE 4, MSAP 5	31
II.11	Conclusion	32

CHAPITRE III :DÉTERMINATION ET ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES STATIQUES DE LA MSAPE	34
III.1 Introduction.....	34
III.2 Détermination des caractéristiques statiques des différentes configurations de la MSAPE 34	
III.2.1 MSAPE 1.....	34
III.2.2 MSAPE 2.....	38
III.2.3 MSAPE 3.....	41
III.2.4 MSAPE 4.....	44
III.2.5 MSAPE 5.....	47
III.3 Comparaison des performances des différentes configurations de la MSAPE	50
III.3.1 Flux magnétique dans une phase	50
III.3.2 Induction électromagnétique	53
III.3.3 Constatation	54
III.4 Conclusion	54
Conclusion Générale.....	56
Résumé	59

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants permanents (MSAP)

Tableau I.1 : Propriétés des principaux aimants.....18

Chapitre II : Modélisation par Eléments Finis de la (MSAPE) et Présentation des Différentes Configuration

Tableau II.1 : Dimensions de la machine 28

Tableau II.2 : Dimension de l'encoche statorique..... 29

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)

Figure I.1 Machine synchrone à pôle lisse	5
Figure I.2 Machine synchrone à pôle saillant.....	6
Figure I.3 Aimants montés en surface	8
Figure I.4 Aimants insérés.....	8
Figure I.5 Aimants à concentration de flux	9
Figure I.6 Aimants enterrés	10
Figure I.7 Configuration de MSAPE.....	12
Figure I.8 Courbe de désaimantation d'un aimant permanent.....	14
Figure I.9 Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants	17
Figure I.10 Rotor d'un servomoteur.....	19

Chapitre II : Modélisation par Eléments Finis de la MSAPE et Présentation des Différentes Configurations

Figure II.1 Barre d'outil du menu principal	26
Figure II.2 Vue coupe de la MSAPE.....	27
Figure II.3 Disposition des aimants du rotor d'un seul pôle.....	28
Figure II.4 Encoche statorique	29
Figure II.5 Vue en coupe des MSAP 1, MSAP 2 et MSAP 3.....	31
Figure II.6 Vue en coupe de la MSAP 4 et MSAP 5.....	32

Chapitre III : Détermination et Analyse des Caractéristiques Statiques de la MSAPE

Figure III.1 Configuration des lignes de flux magnétique (MSAPE1)	35
Figure III.2 Carte d'induction magnétique (MSAPE1).....	35
Figure III.3 Forme d'onde des flux magnétiques des trois phases (MSAPE1)	36
Figure III.4 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dan l'entrefer (MSAPE1)	37
Figure III.5 Evolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE1).....	38

Figure III.6 Carte d'induction magnétique (MSAPE2).....	39
Figure III.7 Forme d'onde des flux magnétique des trois phases (MSAPE2).....	40
Figure III.8 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique de l'entrefer (MSAPE2).....	40
Figure III.9 Evolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE2).....	41
Figure III.10 Carte d'induction magnétique (MSAPE3).....	42
Figure III.11 Forme d'onde des flux magnétique des trois phases (MSAPE3).....	43
Figure III.12 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer (MSAPE3).....	43
Figure III.13 Evolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE3).....	44
Figure III.14 Configuration des lignes de flux magnétique (MSAPE4)	45
Figure III.15 Carte d'induction magnétique (MSAPE).....	45
Figure III.16 Forme d'onde des flux magnétique des trois phases (MSAPE4).....	46
Figure III.17 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer (MSAPE4).....	46
Figure III.18 Evolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE4).....	47
Figure III.19 Configuration des lignes de flux magnétique (MSAPE5)	48
Figure III.20 Carte d'induction magnétique (MSAPE5).....	48
Figure III.21 Forme d'onde des flux magnétique des trois phases (MSAPE5).....	49
Figure III.22 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer (MSAPE5).....	49
Figure III.23 Evolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE5).....	50
Figure III.24 Flux magnétique des machines (MSAPE 1, MSAPE 2 et MSAPE 3).....	50
Figure III.25 Flux magnétique des machines (MSAPE 4, MSAPE 5 et MSAPE 3)	51
Figure III.26 Flux magnétique des différentes machines (MSAPE 1, MSAPE 4).....	52

Figure III.27 Induction électromagnétique des différentes machines (MSAPE 1, MSAPE 2, MSAPE 3).....	53
Figure III.28 Induction électromagnétique des différentes machines (MSAPE 4, MSAPE 5, MSAPE 3)	53
Figure III.29 Induction électromagnétique des différentes machines (MSAPE 1, MSAPE 4).....	54

Notation

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.

MSAPE : Machine synchrone à aimant permanent enterrés.

FEM : Finite Element Method.

FEMM : Finite Element Method Magnetics.

SmCo : Samarium cobalt.

NdFeB :Néodyme-fer-Bore.

Nomenclature

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant [A.m⁻²].

μ_0 : Perméabilité magnétique de vide [H.m⁻¹].

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

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

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

\vec{D} : Vecteur induction électrique [C/m²]

ρ : Charge volumique [C.m⁻³].

ϵ_0 : Permittivité électrique du vide [F/m].

ϵ_r : Permittivité électrique du milieu [F/m].

μ_r : Perméabilité magnétique du milieu

\vec{B}_r : Induction rémanente [T].

H_{CB} : Le champ coercitif.

BH: Le produit d'énergie volumique.

\vec{M} : Aimantation [T].

f_s : Densité de courant des sources.

f_o : Densité de courant des sources d'alimentation.

f_{PM} : Densité de courant surfacique.

$\sigma \vec{E}$: Courant induit (loi d'Om local).

\vec{V}_d : Vitesse de déplacement

σ : Conductivité électrique [Ω/m].

A: Fonction inconnue du problème.

A_0 : Une constante.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis l'aube de l'humanité, l'innovation a été au cœur de notre évolution, répondant à nos besoins croissants et améliorant nos conditions de vie.

Avec l'avènement de la révolution industrielle, les machines ont joué un rôle très important, devenant indispensables tant dans le secteur industriel que même domestique. Les machines électrique traditionnelle telles que les machine à courant alternatif et les machines à courant continu ont toujours prouvé leur robustesse et leur adaptabilité, Toutefois, à partir des années soixante-dix, une nouvelle génération de machines a fait son entrée : les machine synchrones à aimants permanents.

Ces machines, excitées par des aimants permanents, se distinguent par leur efficacité croissante, influencée notamment par la configuration du rotor et la disposition des aimants. Le stator de ces machines reste généralement de conception classique, avec des encoches pour porter un bobinage.

Les machines à aimants permanents se sont révélées particulièrement efficaces dans diverses applications, malgré leurs structures souvent complexes. Afin de reproduire fidèlement leur comportement et d'optimiser leur performance, il est essentiel de disposer de modèles de simulation fiables.

Ce mémoire se concentre sur l'étude et l'analyse d'une catégorie spécifique : la machine synchrone à aimants permanents enterrés, multicouches, en utilisant la méthode des éléments finis à travers le logiciel FEMM. Ce type de machine est largement utilisé en raison des nombreux avantages offerts par les aimants permanents, malgré leur coût élevé.

Dans ce travail, nous présentons une exploration approfondie articulée en trois chapitres distincts. Le premier chapitre propose une étude générale sur les machines synchrones, détaillant leur constitution, leur classification ainsi que les configurations des rotors à aimants permanents. Nous y explorons le principe de fonctionnement des machines synchrones à aimants permanents, leurs différents types de couple, les propriétés des aimants utilisés, leurs applications variées, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technologie.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'utilisation de la méthode des éléments finis pour la modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents, en

détaillant les équations de Maxwell pertinentes. Nous introduisons également le logiciel FEMM, outil central de notre modélisation, et amorçons la conception de la machine.

Enfin, le troisième chapitre expose les résultats obtenus à travers nos simulations, en présentant les cartes de configuration du champ magnétique pour les différentes variantes de machines étudiées. Nous interprétons ces résultats et effectuons des comparaisons pour évaluer l'influence du nombre et de la disposition des couches d'aimants sur les caractéristiques des machines.

Ce mémoire se clôture par une conclusion générale qui récapitule les points essentiels abordés, mettant en lumière les avancées réalisées et les perspectives futures dans le domaine des machines synchrones à aimants permanents enterrés.

CHAPITRE I

Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)

Chapitre 1 : Généralités sur les Machines synchrones à aimants permanents (MSAP)

I.1 Introduction

La machine synchrone est une machine à courant alternative dont la vitesse de rotation est directement liée à la pulsation des courants induits. Elle est généralement utilisée comme génératrice (alternateur) ou comme moteur à vitesse d'entraînement constante et peut être également utilisée comme compensateur afin d'améliorer le facteur de puissance des installations électriques.

L'alternateur transforme l'énergie mécanique que lui fournit la machine qui l'entraîne en énergie électrique. Il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux et constitue le support principal dans la production d'énergie électrique. La machine synchrone assure également la conversion énergétique inverse en transformant l'énergie électrique en énergie mécanique en fonctionnement moteur. Il est utilisé pour l'entraînement des engins de grandes puissances comme les navires et les trains à grande vitesse TGV.

I.2 Définition de la machine synchrone

Le terme machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants permanents, soit par des bobinages électriques. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine, regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont du moteur de quelques watts, aux alternateurs de plusieurs Méga Watts. Néanmoins, la structure de ces machines sont relativement proches. Le stator est généralement constitué de trois enroulements uniformément répartis, tels que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique, soit sinusoïdale ou trapézoïdale. Les stators, notamment en forte puissances, sont identiques à ceux d'une machine synchrone.

I.3 Constitution de la machine synchrone

La machine synchrone est constituée de deux parties, la partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant les enroulements constituant l'induit, la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer.

I.3.1 Le Stator

Son apparence est proche de celle de la machine asynchrone ; les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique peuvent être sinusoïdales ou trapézoïdales, ce qui en fait un bobinage distribué triphasé. Les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe abritent ce bobinage. On le feuillète pour diminuer les courants de Foucault et réduire les pertes de fer. En générale, il est fabriqué à partir d'une tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet une induction élevée

I.3.2 Le Rotor

La machine tournante est séparée du stator par un entrefer qui peut être soit constant (machine synchrone à pôles lisses) ou variable (machine synchrone à pôles saillants). Il se compose d'une rotation parcouru par un courant d'excitation continu (introduit par l'intermédiaire de bagues et de balais) qui génère un champ magnétique fixe à deux pôles.

I.3.3 L'arbre

Son rôle est de transmettre l'énergie mécanique et de guider les masses tournantes. Fabriqué en acier forgé, il doit être conçu pour être adapté aux différentes conditions de fonctionnement. Il ya un ou deux bouts d'arbre dans les machines pour l'accouplement.

I.3.4 Les balais

Il s'agit de composants conducteurs, habituellement fixés, qui garantissent la connexion électrique grâce à un contact glissant entre la partie fixe et la partie mobile.

I.3.5 Les paliers

Ce sont des organes réalisés en acier soudé, destinés à supporter l'arbre tournant et pouvant limiter son déplacement axial. Ils reçoivent des roulements à billes ou à rouleaux. Un dispositif de graissage assure la lubrification.

I.3.6 Les flasques

Ce sont des pièces massives ou ajourées. Fixées à la carcasse servant à protéger les enroulements.

I.3.7 Les portes balais

Organe servant à porter les balais, et permettant de les maintenir en contact avec la surface mobile.

I.3.8 Les bagues collectrices

Sont des organes conducteurs sur lesquels s'appuient les balais, destinées à permettre le passage du courant du circuit induit au circuit inducteur pour une machine auto-excitée.

I.3.9 La carcasse

Ce sont des pièces ensembles, soutenant et renferment le paquet statorique , assurant la protection contre les chocs extérieur. Sur la carcasse, on dispose d'une plaque signalétique indiquant les caractéristique de la machine et sont régime fonctionnement [1].

I.3.10 La boîte à bornes

C'est un dispositif permettant le raccordement des extrémités des conducteurs de la machines avec le réseau extérieur.

I.4 Classification des machines synchrones

Il existe trois grandes familles de rotors, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique.

I.4.1 Machines synchrones à pôles lisses

La machine synchrone à pôles lisse est constituée d'un cylindre en acier ferromagnétique ou les encoches qui abritent le bobinage inducteur ont été fraisées. En général, il comporte deux ou quatre pôles .Ce genre de construction, qui se distingue par un entrefer permanent, est employé pour des machines à haute puissance destinées à fonctionner à des vitesses élevées [2].

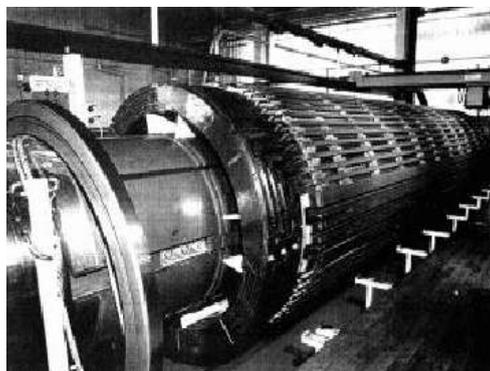


Figure I.1 Machine synchrone à pôle lisse.

I.4.2 Machines synchrones à pôles saillants

En plaçant des pièces polaires sur une culasse avec des enroulements d'excitation constituées par des bobines on obtient un rotor constitué de paires de pôles. On utilise ce type de machines dans les centrales hydrauliques [3].

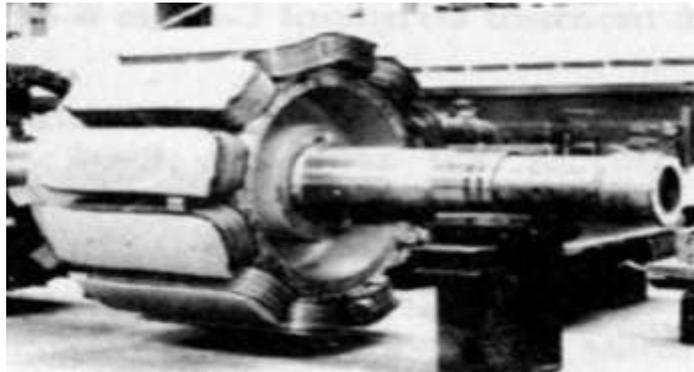


Figure I.2 Machine synchrone à pole saillant.

I.4.3 Machines synchrones à aimant permanent (MSAP)

Historiquement, les premiers aimants permanents ont été utilisés au début du 19^{ème} siècle. De performances très modestes à leurs débuts, les progrès réalisés depuis plus d'un siècle ont contribué au développement des machines à aimants. L'utilisation d'aimants permanents est aujourd'hui quasiment systématique pour les puissances inférieures à 10KW et s'étendent maintenant vers les fortes puissances [4].

Au-delà, le coût d'utilisation d'aimants devient souvent prohibitif. Seules quelques applications très spécifiques, comme par exemple la propulsion navale ou les contraintes d'encombrement sont majeures, envisagent l'utilisation des aimants pour des fortes puissances.

I.5 Configurations des MS à aimants permanents (MSAP)

Le stator d'un moteur synchrone à aimants permanents (PM) est très similaire à celui d'un moteur à induction polyphasé. Au cours de la dernière décennie, diverses géométries de moteurs synchrones à aimants permanents ont été utilisées. Elles sont généralement basées sur des améliorations de la densité de puissance et de l'efficacité grâce à l'adoption de l'amélioration du flux, de la réduction de la réaction de l'induit et du fonctionnement à haute

vitesse. Deux configurations principales de moteurs synchrones à aimants permanents existent : le type à aimants de surface, où les aimants sont montés sur la surface extérieure du rotor, et le type à aimants enterrés, où les aimants sont montés à l'intérieur de la structure magnétique du rotor.

Le montage des aimants à la surface du rotor est la méthode la plus simple et la moins coûteuse pour la construction d'une MSAP. Les aimants montés en surface sont généralement collés à l'arbre et parfois liés avec un matériau non conducteur. Cette conception de montage en surface tend à produire un diamètre de rotor réduit avec une faible inertie, ce qui convient à une performance dynamique rapide. Un autre type de moteur à aimants de surface est le moteur à aimants insérés. Cette machine possède des aimants couvrant moins d'un pas de pôle montés à la surface du rotor, avec une dent de rotor en fer remplissant l'espace entre les aimants. Dans cette machine, la saillance fournit un couple de réluctance significatif en plus du couple d'aimant. Le rapport de réactance élevé permet l'opération de l'affaiblissement du flux du moteur synchrone PM et aide également à réduire les pertes de cuivre harmoniques dans le moteur [5].

Une autre méthode pour monter les aimants sur la surface du rotor consiste à les intégrer à l'intérieur du rotor. Cette conception intérieure offre une robustesse mécanique et un entrefer plus petit, ce qui se traduit par une composante de couple de réluctance en plus du couple développé grâce à l'excitation PM. Les conceptions à aimants de surface et intérieurs sont radialement magnétisées, donc la densité de flux à vide est limitée à la densité de flux de l'aimant. Si une densité de flux d'entrefer plus élevée est requise, la conception à aimants intérieurs peut être employée, où les aimants sont magnétisés dans la direction circumférentielle avec les pôles en opposition pour concentrer le flux au niveau du pôle par rapport à la surface de l'aimant.

Un autre type de MSAP est la machine à champ axial, où la direction du champ magnétique est axiale au lieu d'être radiale. Les machines PM à pôle en griffe utilisées dans les alternateurs automobiles et les machines à rotor disque avec une inertie de rotor très faible sont des exemples de machines à flux axial [6].

I.5.1 MSAP à Aimants montés en surface

Aussi appelées machines à pôles lisse, les aimants sont montés sur la périphérie du rotor, ce type de structure est le plus fréquemment utilisé pour son faible coût et sa simplicité de constitution, l'inconvénient c'est que les aimants sont soumis à la force centrifuge ce qui peut

causé le détachement des aimants pour remédier à cela en utilise un cylindre non ferromagnétique et de haute conductivité, et peut aussi servir d'amortisseur et donner un couple de démarrage asynchrone [7].

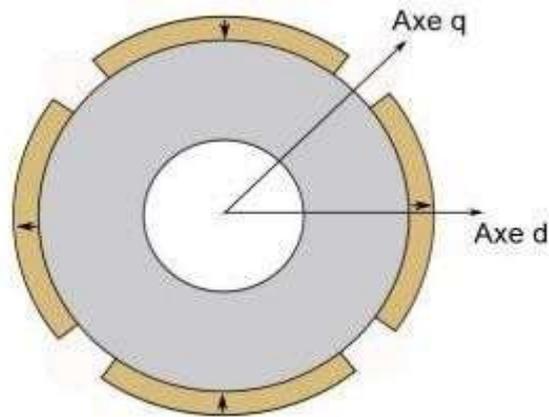


Figure I.3 Aimants montés en surface.

I.5.2 MSAP à Aimants insérés

La configuration est similaire à celle des aimants montés en surface, néanmoins du fer est ajoutés aux ouvertures entre les aimants ce qui génère une saillance, la machine à pôles saillant offre un excellent rapport poids-puissance et la consolidation des aimants n'est plus nécessaire [8].

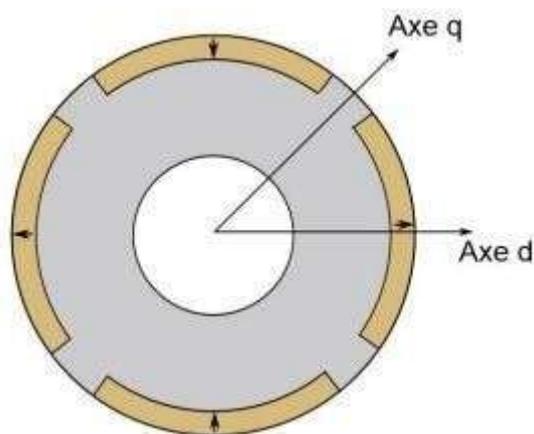


Figure I.4 aimants insérés.

I.5.3 MSAP à Aimants à concentration de flux

Cette forme de structure utilise une distribution tangentielle de l'aimantation, elle entraîne une concentration de flux très élevée dans le rotor. Cela entraîne une augmentation de l'induction dans l'entrefer, les aimants utilisés dans cette topologie sont principalement de type ferrite afin d'éviter la saturation magnétique de l'acier ce qui la rend adapter à des applications où le volume n'est pas un obstacle

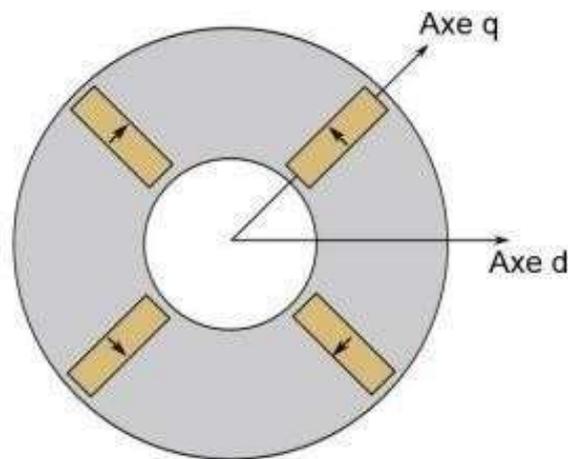


Figure I.5 aimants à concentration de flux.

I.5.4 MSAP à Aimants enterrés

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) à aimants enterrés sont un type particulier de moteurs électriques où les aimants permanents sont intégrés à l'intérieur du rotor.

Les inducteurs de ce genre de machines ont une structure complexe en termes de géométrie les aimants sont enfouis au sein du rotor, grâce à sa solidité mécanique, ce genre de rotor peut atteindre des vitesses extrêmement élevées pour des puissances considérables, et les aimants sont protégés des forces centrifuges.

Les MSAP à aimants enterrés présentent plusieurs avantages. Le rotor intégré offre une meilleure résistance mécanique, permettant des vitesses de rotation plus élevées sans risque de défaillance des aimants. La conception permet d'atteindre des densités de flux plus élevées, améliorant ainsi les performances globales du moteur. Un meilleur contrôle du flux

magnétique et une réduction des pertes conduisent à une meilleure efficacité énergétique et à un couple plus élevé. De plus, les MSAP à aimants enterrés bénéficient d'un couple de réluctance additionnel en plus du couple produit par les aimants permanents, ce qui améliore les performances globales du moteur.

Cependant, ces moteurs ont aussi des inconvénients. La conception et la fabrication du rotor sont plus complexes et coûteuses en raison de la nécessité d'insérer les aimants à l'intérieur du rotor. Les aimants et les matériaux magnétiques utilisés peuvent être plus coûteux, en particulier si des aimants en terres rares sont utilisés pour maximiser les performances. Enfin, la dissipation de chaleur peut être plus complexe en raison de la disposition interne des aimants, nécessitant des solutions de refroidissement efficaces pour éviter la surchauffe.

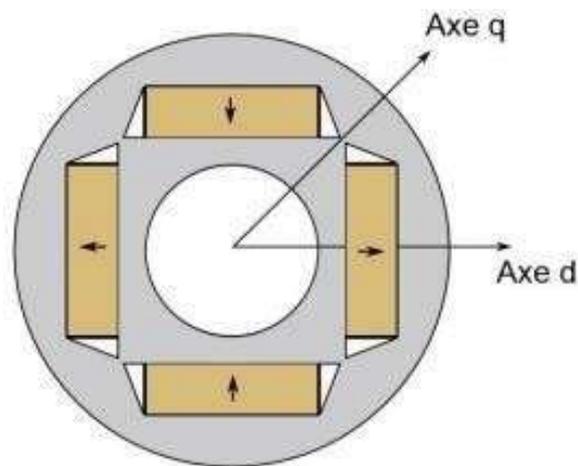
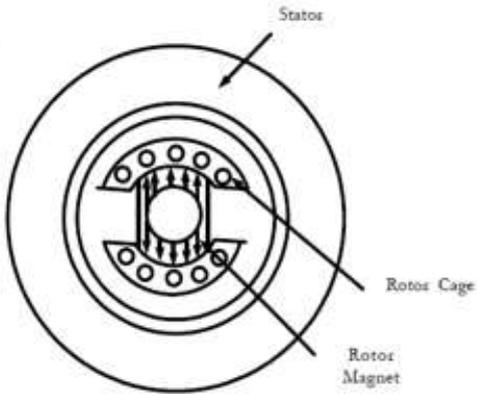
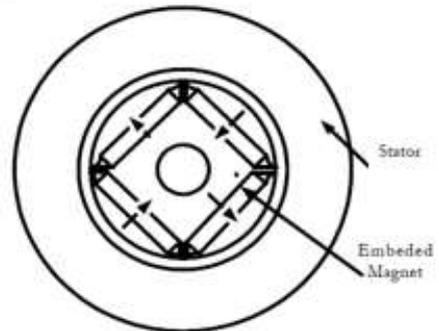


Figure I.6 Aimants enterrés.

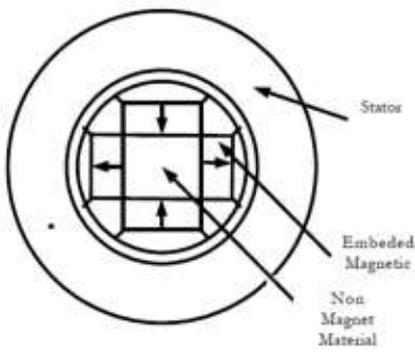
Ci – après quelques configurations de MSAP à aimant enterrés tirées de la littérature [9].



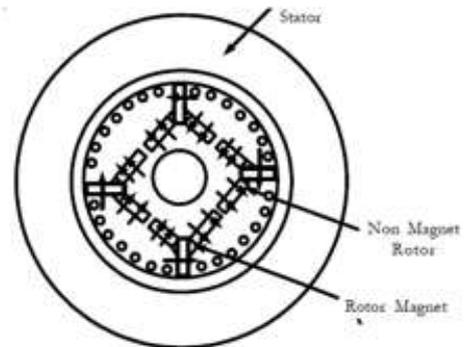
Configuration classique d'un rotor à aimant enterré



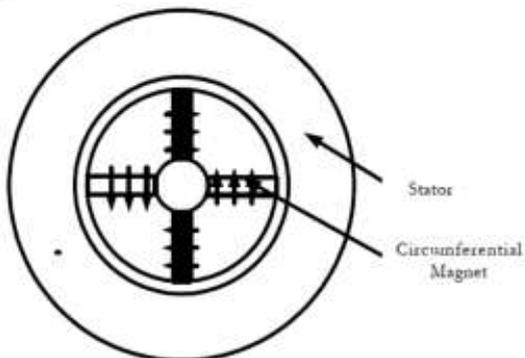
Machine AP à rotor à aimant incorporé



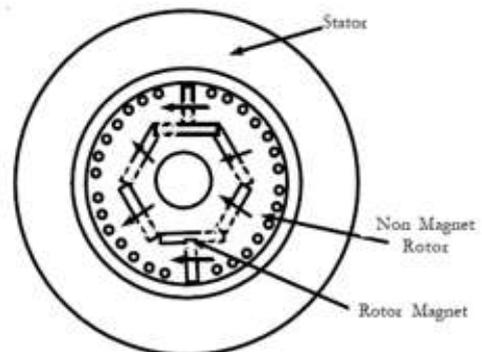
Machine AP à rotor à aimant enterré



Nouvelle conception de la machine AP à rotor à aimant enterré



Machine AP à rotor à aimant circonférentiel



Rotor magnétisé à direction spéciale avec machine AP à cage

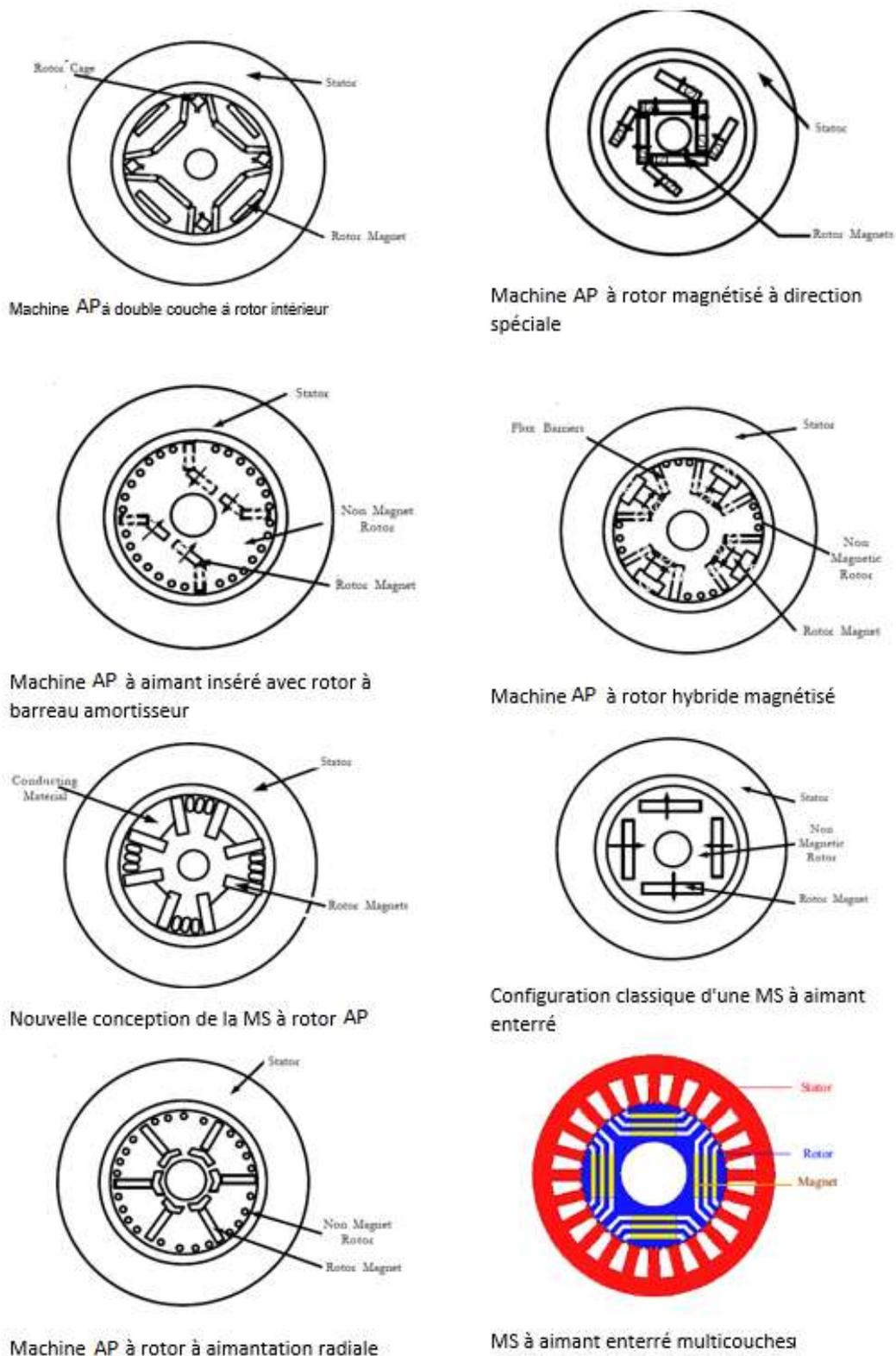


Figure I.7 Quelques configurations de MSA à aimants enterrées

I.6 Principe de fonctionnement de la MSAP

L'alimentation du stator avec une tension triphasé décalé de 120 degrés donne naissance à un champ tournant de vitesse ω_s . Le rotor composé d'aimants qui forme des champs multipolaire qui vont essayer de s'accrocher au champ magnétique crée par le stator ce qui fera tourner le rotor. Le rotor tourne à la vitesse du champ tournant divisée par le nombre de paires de pôles $\Omega = \omega / p$

I.6.1 Fonctionnement en mode moteur

Le démarrage d'un moteur synchrone à pleine tension depuis le réseau est impossible, car le rotor a une vitesse nulle au démarrage, afin d'utiliser une alimentation directe en 50 Hz il est nécessaire d'amener la charge à la vitesse de synchronisme puis la raccorder à l'alimentation.

I.6.2 Fonctionnement en mode génératrice

Avant d'établir la connexion entre la machine synchrone et le réseau il est nécessaire de faire tourner le rotor à la vitesse de synchronisme grâce à un moteur annexe ensuite en ajustant le courant d'induction, amener la FEM créée par l'alternateur à la même valeur du réseau.

I.7 Les différents couples de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) peuvent générer différents types de couples, chacun ayant un impact sur les performances globales de la machine.

I.7.1 Couple réluctant

Appelé aussi couple de saillance, est dû à la saillance de la culasse rotorique ce qui fait varier l'inductance selon la position du rotor dans le cas d'un rotor à pôles lisse le couple réluctant est nulle. Le couple réluctant est particulièrement présent dans les moteurs à saillance prononcée, où la différence entre la réluctance sur l'axe d (direct) et l'axe q (quadrature) est significative.

I.7.2 Couple de détente

Ce couple est dû à l'interaction entre les dents du stator et les aimants permanents du rotor. Bien que souvent indésirable car il provoque des ondulations de couple à basse vitesse, il peut être minimisé soit en inclinant les encoches ou les aimants. L'inclinaison des encoches rendent l'opération de bobinage difficile généralement on préfère incliner les aimants.

I.7.3 Couple Électromagnétique

C'est la somme du couple d'interaction et du couple de réluctance. Il représente le couple total produit par la machine et est responsable de la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Le Couple d'Aimantation (Couple de Magnétisation) est produit directement par l'interaction entre le champ magnétique généré par les aimants permanents et le champ magnétique du stator. Il est proportionnel à la densité de flux des aimants et les courants statoriques.

I.8 Définition d'un aimant permanent

Les aimants sont présents naturellement, mais il est également possible de transférer cette capacité de magnétisme à certains corps, principalement constitués de fer, nickel, et de cobalt, qu'on désigne sous le nom d'aimants artificiels.

Il y a un pôle nord et un pôle sud dans un aimant, avec deux pôles de types opposés (N-S), deux pôles de même type (N-N ou S-S) s'attirent. Il y a un champ magnétique dans l'espace autour des pôles d'un aimant, constitué de lignes de flux ou de forces.

Les lignes forment des boucles qui partent de pôle nord et entrent dans le pôle sud. L'ensemble de ces lignes de force constitue le spectre magnétique [10].

I.9 Les aimants permanents et leurs caractéristiques

Les aimants permanents sont des corps qui possèdent la capacité de maintenir une aimantation rémanente très élevée et qui se désaimantent difficilement une fois aimantés.

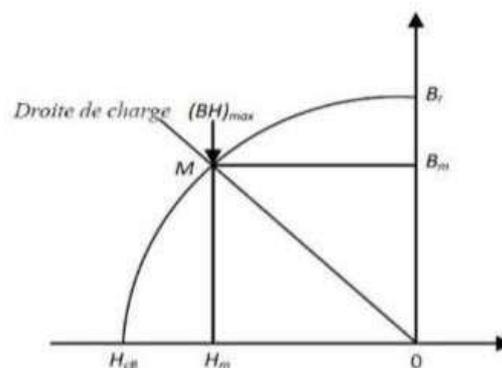


Figure I.8 courbe de désaimantation d'un aimant permanent.

Il est crucial de sélectionner des aimants permanents car ils jouent un rôle crucial dans le couple massif d'une machine.

La principale caractéristique des aimants permanents réside dans leurs cycles d'hystérèse, notamment la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan B-H. Cette courbe est caractérisée par :

- L'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle au circuit fermé.
- Le champ coercitif H_{cB} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction. Plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable.
- Le produit d'énergie volumique (BH).

I.10 Différent types d'aimants permanents utilisés dans les MSAP

Selon les caractéristiques démagnétisantes, les aimants permanents peuvent être subdivisés en plusieurs groupes tel que montré par la figure (I.9). Il existe aujourd'hui, principalement, trois familles de matériaux conduisant 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 terre rares.

I.10.1 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 (Al Nico) à base de fer, d'aluminium et de nickel, avec des additions de cobalt, cuivre ou de titane. Ils peuvent être isotropes ou anisotropes. Pour les isotropes $B_r \approx 0.7$ T, H_c de 50 à 80 kA/m et (BH) max de 12 à 18 KJ/m³. Le titane augmente la trempabilité, le niobium la coercivité. La faible valeur de leur champ coercitif rend difficile leur utilisation au niveau des machines électriques. Le plus grave inconvénient est qu'en cours de fonctionnement, ils nécessitent généralement une réaimantation [11].

I.10.2 Les ferrites

Les ferrites sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes. Suivant la composition et le mode de fabrication, on obtient les propriétés suivantes : B_r de 0.2 à 0.4 T, H_c de 140 à 300 kA/m et (BH) max de 10 à 40 KJ/m³. Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée permettant de les utiliser dans les machines. En raison de la faible valeur d'aimantation rémanente, il faut cependant recourir à des structures complexes de

machines, à concentration de flux, pour atteindre des couples massiques et volumiques élevés [12].

I.10.3 Terre rares

Les terres rares sont les meilleurs matériaux pour aimants performants. Ils paraissent très bien appropriés pour les machines électrique. Leur cout encore élevé, a tendance à freiner l'extension de leur utilisation. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les Plasto-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 [13].

I.10.3.1 Samarium cobalt (SmCo)

Les aimants de type Samarium-Cobalt sont connus dans le milieu industriel principalement sous deux formes, SmCo_5 et $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Ils présentent à l'état massif des propriétés très intéressantes. Tout d'abord, leur comportement magnétique est remarquable : le SmCo_5 possède un champ coercitif très élevé de l'ordre de 2000 KA/m, ce qui en fait un aimant résistant à la désaimantation. Pour $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, ce champ est de 1000 KA/m, ce qui est excellent également. Leurs aimantations rémanentes sont respectivement de 0,9 T et de 1,15 T et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C)

Les moteurs à aimants du type ferrites sont moins coûteux que les moteurs à aimants du type SmCo, mais aussi moins performants.

I.10.3.2 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 pris 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 production dans l'entrefer est importante, son champ coercitif est élevé.

Ils sont constitués essentiellement de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Ils sont moins couteux que les Samarium-Cobalt et présentent des propriétés magnétiques supérieures. Leur produit d'énergie volumique et $(\text{BH})_{\text{max}}$ atteint 400 KJ/m³ à température ambiante.

L'inconvénient principal de ce type d'aimant est qu'ils sont peu utilisables à des températures supérieures à 100°C et sont très sensible à l'oxydation de l'air [14].

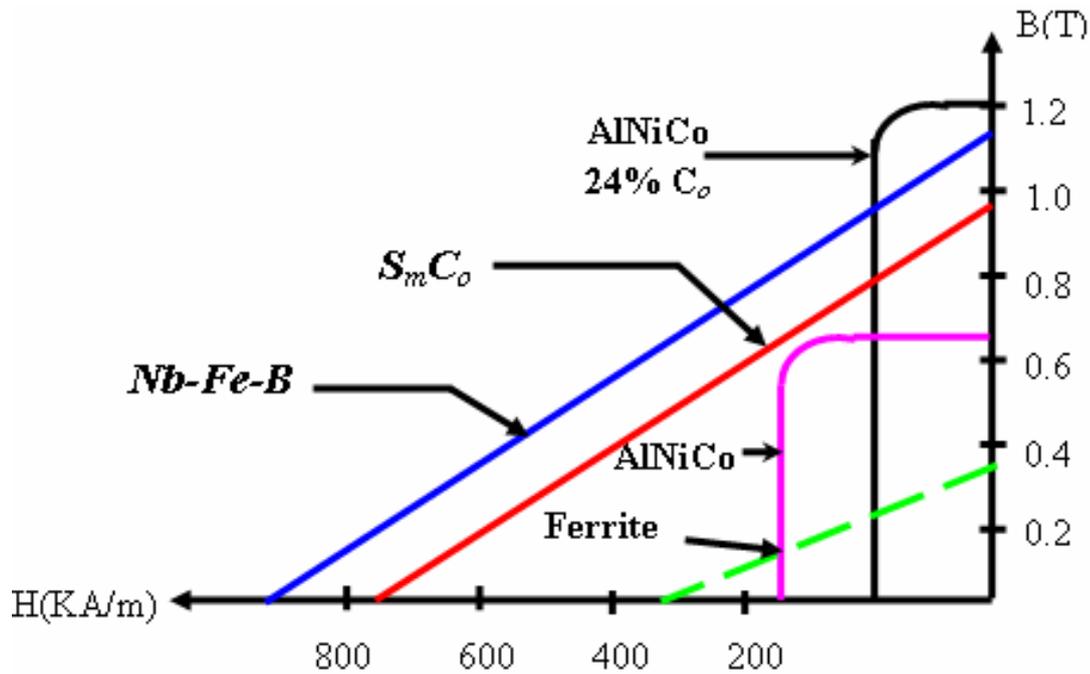


Figure I.9 courbes de désaimantation des principaux types d'aimants permanents.

I.10.3.3 Récapitulatif

Les propriétés des matériaux PM influencent grandement les performances des machines à aimants permanents. Ils sont utilisés pour l'excitation des machines, avec des applications allant de la robotique aux entraînements commerciaux standard et aux systèmes de production d'énergie. Les MSAP à aimants permanents offrent divers avantages tels qu'un rendement et un facteur de puissance élevés, un couple massique élevé, une construction sans balais, etc.

Il est également crucial de connaître le type de conception et de configuration utilisé dans une machine électrique. Les exigences de l'application déterminent le type de matériau PM utilisé en raison du coût, de la taille et du poids. Il est essentiel de considérer la plage de température de fonctionnement, le champ de démagnétisation externe, la contrainte de poids et la limitation d'espace dès la phase de conception. Les moteurs PM aux caractéristiques commerciales utilisent des aimants en céramique ou en néodyme-fer-bore lié par polymère. Pour les moteurs haute performance, où les contraintes de taille et de poids sont présentes, des aimants en terres rares frittés sont utilisés. Dans les applications où le moteur est exposé à des environnements extrêmes, les aimants Alnico sont préférés.

L'utilisation de matériaux PM à base de Nd-Fe-B permet de concevoir et développer des machines électriques de toutes tailles, entièrement ou partiellement excitables par ces aimants permanents. Le tableau 1.1 répertorie quelques matériaux PM disponibles utilisés dans les machines tournantes électriques. Les aimants Alnico peuvent transporter des densités de flux équivalentes à celles des fers magnétiques doux, mais ils se démagnétisent facilement en raison de leurs faibles valeurs de force coercitive par rapport aux aimants en céramique. Les aimants en céramique sont bon marché mais limités par une faible densité maximale d'énergie en raison de faibles valeurs de rémanence. Les matériaux PM en terres rares, tels que les alliages de samarium-cobalt, ont des propriétés magnétiques plus souhaitables, mais ils sont coûteux. À l'exception des aimants en terres rares liés par polymère, les ferrites et les aimants métalliques à base de cobalt sont physiquement durs et fragiles. Le choix du matériau PM est spécifique à l'application, mais les tendances récentes inclinent à utiliser les aimants en terres rares Nd-Fe-B en raison de leur densité d'énergie et densité de flux résiduel les plus élevées parmi les matériaux PM disponibles [15].

Tableau I.1 : Propriétés des principaux aimants à 20 °C

Matériaux	Br en tesla	Hc en KA/m	T° de curie en °C	Remarques diverses
Ferrites	0.2 à 0.4	200	300	Les moins chers
Alnico	1.2	50	750 à 850	Se démagnétisent trop facilement
Samarium Cobalt	0.5	800	700 à 800	Prix élevé à cause de cobalt
Néodyme fer bore	1.3	1500	310	Prix en hausse (terre rare) sujet à L'oxydation

I.11 Avantage des MSAP

- Facteur de puissance et rendement élevé
- Couple massique élevé
- Absence de contact ballais bagues
- Une meilleure performance dynamique
- Absence de pertes joules au rotor
- Simplicité de maintenance

I.12 Inconvénient des MSAP

- Cout élevé des aimants
- Ondulation de couple
- Interaction magnétique du au changement de structure
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants

I.13 Domaine d'application

Ce type de machine peut être employé dans multiple application comme :

- La robotique
- Les équipements domestiques tels que les machines à laver
- L'automobile. La voiture électrique utilise ce genre de moteur
- Dans les grandes surfaces telles que les ascenseurs les escaliers électriques
- Fraise de dentiste etc

Le domaine d'application des msap est limité pour de manière générale à quelque dizaines de kilowatts à cause des aimants permanents qui peuvent perdre leur caractéristique.



Figure I.10 Rotor d'un servomoteur.

I.14 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons mené une étude sur la machine synchrone. Dans un premier temps, nous avons abordé la constitution de la machine synchrone, en détaillant sa classification et les configurations des rotors à aimant permanent. Ensuite, nous avons expliqué le principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) en décrivant ses différents types de couple et leurs caractéristiques. Nous avons également discuté des différents types d'aimants utilisés dans les MSAP, leurs propriétés et caractéristiques spécifiques. Par la suite, nous avons exploré les domaines d'application des MSAP. Enfin, nous avons conclu en présentant les avantages et les inconvénients de cette technologie.

CHAPITRE II

Modélisation Par Éléments de la MSAP et Présentation des Différentes Configurations

II. CHAPITRE II : MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE LA MSAPE ET PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS

II.1 Introduction

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes qui régissent son fonctionnement

La méthode numérique la plus courante est la méthode des éléments finis qui est une méthode très attractive dans la conception et l'analyse des dispositifs électromagnétique, particulièrement les machines électriques. C'est une méthode très générale pour la résolution des divers problèmes rencontrés en pratique : stationnaires ou linéaires ou non, définis dans un domaine géométrique.

Dans ce chapitre on s'intéressera à la simulation au niveau de la machine synchrone à aimant permanents enterrés multi couches dans le but de déterminer l'induction et le couple de détente de chaque couche d'aimant, en utilisant le logiciel FEMM.

II.2 Equations du champ électromagnétique

Les diverses lois expérimentales découvertes initialement de façon empirique et par la suite présentées de manière précise, ont été synthétisées et complétées par Maxwell vers 1885, en introduisant un paramètre manquant, appelé courant de déplacement, pour former un groupe de quatre équations aux dérivées partielles, qui décrivent complètement les champs électrique et magnétique, appelées " Equations de Maxwell ".

Ainsi, quel que soit le milieu continu, les équations dites de Maxwell permettent de décrire l'évolution des grandeurs électromagnétiques dans ce milieu, et s'écrivent sous forme différentielle " locale " ou intégrale.

Compte tenu de la basse fréquence des phénomènes associés aux machines électriques (fréquences industrielles $< 1\text{kHz}$) et l'absence de champ électrostatique important, il est admis de négliger les courants de déplacement devant les courants de conduction.

Les champs électromagnétiques sont alors régis par les équations de Maxwell qui se présentent comme suit (forme différentielle générale)

$$\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

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

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.4})$$

\vec{E} , \vec{H} sont respectivement les champs électriques et magnétique. Le vecteur \vec{j} , désigne la densité de courant électrique et \vec{B} l'induction magnétique.

L'équation (II.2) montre le couplage entre le champ(E) et l'induction (B)

II.3 Les relations constitutives du milieu

Ces équations viennent en fait compléter les équations de Maxwell. Elles expriment les rapports existant entre champs de même nature. Les propriétés de la matière où se développent ces champs interviennent sous la forme de relations de comportement entre \vec{B} et \vec{H} d'une part, \vec{D} et \vec{E} d'autre part pour les milieux diélectriques et magnétiques, elles s'écrivent comme suite :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r = \mu \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\mu_r \vec{H} + \vec{M}) \quad (\text{II.6})$$

ϵ_0 : permittivité électrique du vide égale à $\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ [F/m]

ϵ_r : permittivité électrique du milieu [F/m]

μ_0 : perméabilité magnétique du vide, égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]

μ_r : perméabilité magnétique du milieu

B_r : Induction rémanente [T]

\vec{M} : Aimantation [T]

II.4 Loi d'Ohm

Dans les milieux conducteurs, la densité de courant est reliée au champ électrique par la loi d'Ohm :

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E}) + \vec{j}_0 + \vec{j}_{PM} \quad (\text{II.7})$$

σ : conductivité électrique [Ω /m]

Les trois termes du second membre de l'équation II-7 n'apparaissent pas

simultanément en un point du domaine d'étude. Le premier terme correspond au courant induit, le second est la densité de courant des sources d'alimentation et le dernier est la densité de courant surfacique équivalente de l'aimant en présence.

II.5 Passage des champs aux potentiels

Les potentiels électromagnétiques sont introduits lorsque le rotationnel ou la divergence d'un champ électromagnétique est nul.

Etant donné que la divergence de l'induction magnétique B est nulle

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

Ce qui permet d'introduire un potentiel vecteur magnétique A tel que :

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

En électrostatique, le rotationnel du champ électrique nul

$$\text{rot}.\vec{E} = 0$$

Implique un champ gradient d'un potentiel scalaire électrique V tel que :

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

II.6 Condition aux limites (condition de passages)

II.6.1 Condition de Dirichlet

La valeur précise de l'inconnue sur la frontière du domaine de résolution est imposée par la condition de Dirichlet.

$$A = A_0 \tag{II.8}$$

Avec :

- A : Fonction inconnue du problème.
- A_0 : une constante.

On parle de condition de Dirichlet homogène quand $A = 0$ le long de la frontière du domaine.

II.6.2 Condition de Neumann

C'est une condition qui renseigne sur la valeur de la composante normale de l'inconnu sur la limite du domaine étudié.

$$\frac{\partial A}{\partial n} \quad \text{Donné} \quad (II.9)$$

On parle de Neumann homogène sur les plans de symétrie, quand $\partial A / \partial n = 0$, défini le long de la frontière du domaine.

II.6.3 Condition de passage

A la séparation de deux milieux notés 1 et 2, de perméabilité magnétique μ_1 et μ_2 , on doit assurer la continuité de la composante normale de l'induction. Lorsqu'il n'y a pas de courant superficiel, il y a la continuité de la composante tangentielle du champ électromagnétique.

$$\begin{aligned} B_{n1} &= B_{n2} \\ H_{t1} &= H_{t2} \end{aligned} \quad (II.10)$$

Les équations différentielles à résoudre dans les régions du domaine d'étude sont :

➤ Dans les conducteurs :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (II.11)$$

➤ Dans le fer :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (II.12)$$

➤ Dans l'air :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (II.13)$$

➤ Dans les aimants :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{pm} \quad (II.14)$$

➤ Sur le contour externe de la machine :

$$A_z = 0$$

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre les équations précédentes.

II.7 Principe de la méthode des éléments finis

L'idée fondamentale sur laquelle repose la méthode des calculs par éléments finis, est la recherche d'une fonction générale qui représente le phénomène étudié en tout point de la structure. Cette structure doit être divisée en parties finies. Puis résoudre les équations de Maxwell sur chaque une des parties, les conditions aux limites et les propriétés de continuité requises.

Cette méthode s'agence selon ces étapes :

- Définition des paramètres de structure
- Définition des paramètres géométrique
- Définition des zones
- Attribution des matériaux pour chaque zone
- Application des conditions aux limites
- Maillage de la structure

II.8 Description de logiciel FEMM

Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics), est un logiciel à deux dimensions cartésiennes et deux dimensions axisymétriques. Il permet de résoudre des problèmes électromagnétiques de basse fréquence. Il est divisé en trois parties comme suit :

II.8.1 Shell interactif

Ce programme est un préprocesseur qui contient une interface pour tracer la géométrie du problème à résoudre, définir le matériau et les conditions aux limites.

Le tracé peut être fait manuellement en procédant avec les outils du logiciel ou bien en passant par le compilateur LUA.

II.8.2 Triangle

Triangle scinde la zone solution en un important nombre de triangles finis, chaque triangle étant repéré par ses trois sommets, dans chaque élément le potentiel vecteur est approché par un polynôme de premier degré

II.8.3 Solveur

Chaque solveur prend un ensemble de données qui décrivent le problème et résolvent les équations pertinentes pour obtenir des valeurs dans tout le domaine de solution

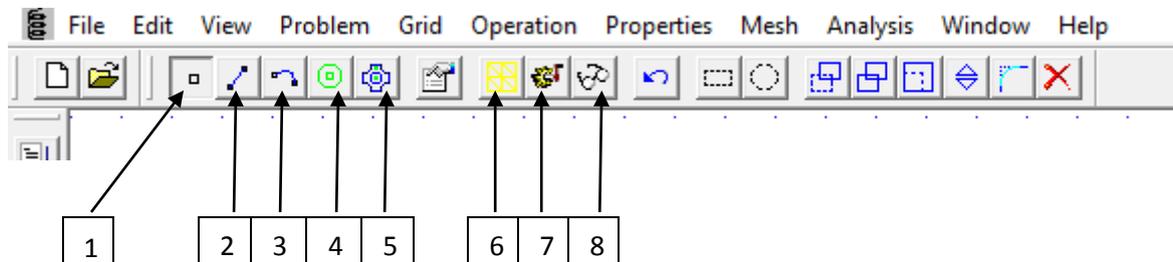


Figure II.1 barre d'outils du menu principal.

- 1 : mode nœud ; permet de mettre des nœuds soit avec le curseur ou avec le bouton TAB
- 2 : mode segment permet de relier entre les nœuds avec des segments
- 3 : mode arc permet de relier entre les nœuds et crée des arc
- 4 : mode région permet d'associer un matériau à une région prédéfini par les arcs et (ou) des segments
- 5 : mode groupe permet de sélection a groupe de segment, arc, matériaux pour effectué une action de groupe
- 6 : triangle permet de décomposé la machine en un grand nombre de triangle fini
- 7 : solveur permet de lancer l'analyse du problème et de le résoudre
- 8 : visualisateur permet de visualisé les résultats du problème résolu

II.9 Présentation de la machine d'étude

La machine que nous nous proposons d'étudier est une machine synchrone triphasée à aimants permanents enterrées multicouches (3 couches) au rotor, à 2 paires de pôles et 24 encoches au niveau du stator.

Le nombre d'encoches par pôles et par phase et égale à 2

La figure II-11 présente une coupe transversale de la MSAP. Un aimant permanent NdFeB a été utilisé dans cette machine.

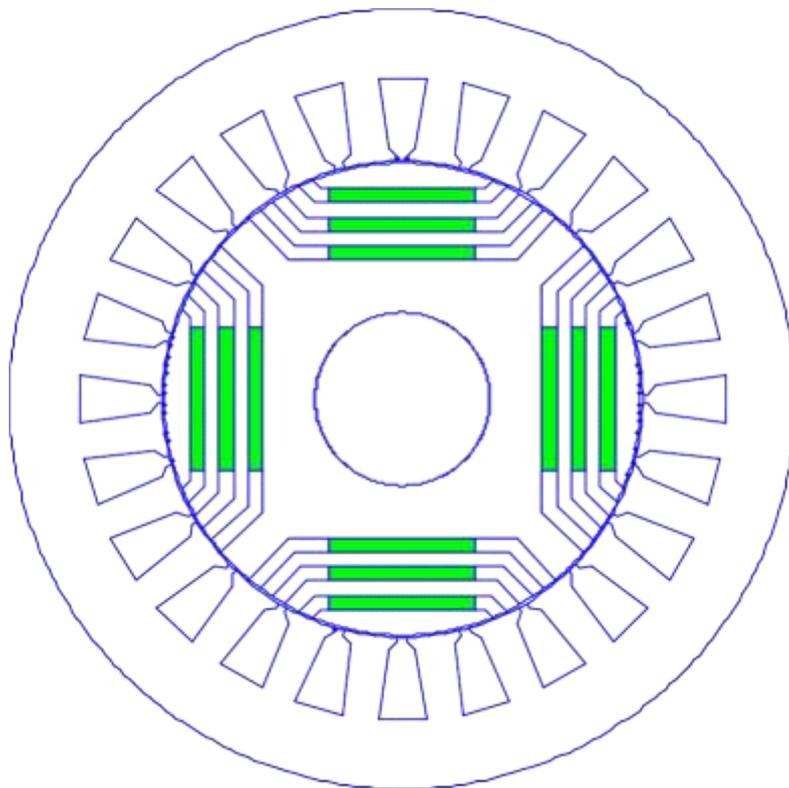


Figure II.2 Vue en coupe de la MSAP.

Propriété du NdFeB :

$B_r = 1.3$ Tesla

$H_c = 1500$ Ka /m

$\theta = 310$ °C

II.9.1 Dimensions de la machine :

Les dimensions de la machine sont présenter dans le tableau si dessous **Tableau II.2**

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de pôles	4	/
Nombre d'encoches	24	/
Nombre de phases	3	/
Rayon externe du stator	270	mm
Rayon interne du stator	165	mm
Rayon externe du rotor	163.5	mm
Rayon interne du rotor	60	mm
épaisseur de l'entrefer	0.75	mm
Longueur de l'aimant	50	mm
épaisseur de l'aimant	5	mm

Tableau II.2 dimensions principales de la machine étudiée.

II.9.2 Disposition des aimants du rotor

Les aimants que nous avons utilisé dans la machine d'étude sont de type NdFeB, espacé de 5 mm entre chaque aimant et sont disposés comme le montre la Figure II.3

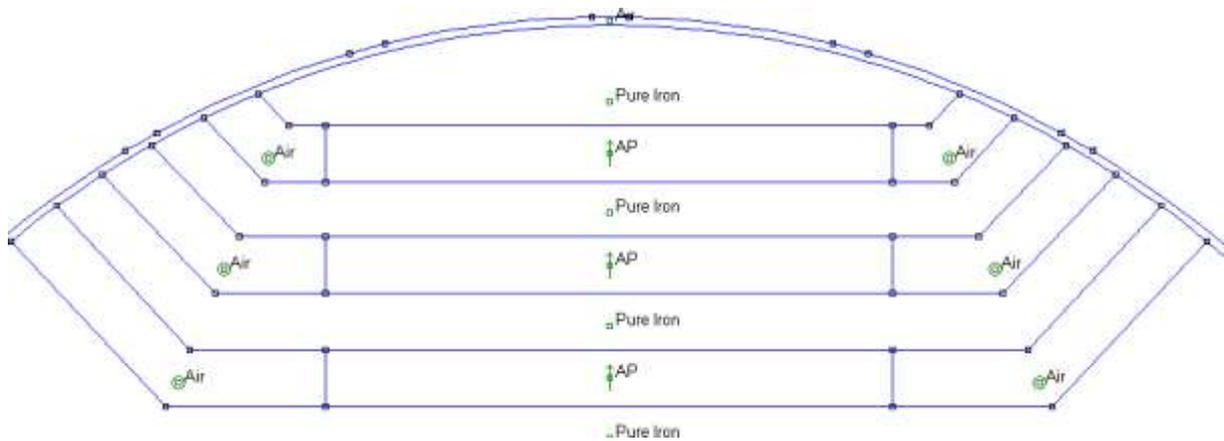


Figure II.3 Disposition des aimants du rotor d'un seul pôle.

II.9.3 Dimension de l'encoche

Le stator est constitué de 24 encoches de formes trapézoïdales dont les dimensions sont les suivantes :

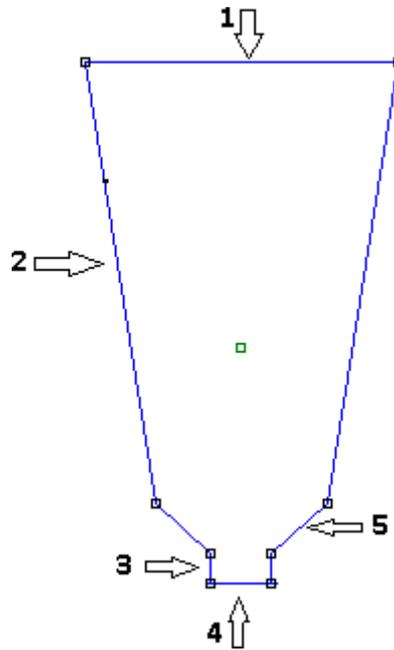


Figure II.4 encoche statorique.

Ci-dessous, le **Tableau II.3** représente les dimensions de l'encoche statorique :

1	16.8 mm
2	24.28 mm
3	1.62 mm
4	3.25 mm
5	4.03 mm

Tableau II.3 dimension de l'encoche statorique.

II.10 Structures de la machine étudiée avec différents niveaux et dispositions de couches d'aimants

Nous prévoyons d'étudier cinq types de machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE), que nous dénommons MSAPE 1, MSAPE 2, ..., MSAPE 5. Elles se distinguent par le nombre de couches d'aimants que chaque pôle comporte et par leur proximité à l'entrefer ou à l'arbre de la machine.

- MSAPE 1 comporte une seule couche d'aimants, proche de l'arbre.

- MSAPE 2 comporte deux couches d'aimants : la première est celle de la MSAPE 1, à laquelle on ajoute une seconde couche, séparée de la précédente par 5 mm.
- MSAPE 3 comporte trois couches d'aimants. Elle est obtenue à partir de la MSAPE 2, en ajoutant une couche supplémentaire, également séparée des précédentes de 5 mm. Cette dernière couche est proche de l'entrefer.
- Pour les MSAPE 4 et 5, la disposition est différente. La MSAPE 4 comporte une seule couche d'aimants, mais celle-ci est placée près de l'entrefer de la machine.
- La MSAPE 5 est obtenue en ajoutant une deuxième couche d'aimants, séparée de la première par 5 mm. Si on ajoute une autre couche à la MSAPE 5, on obtient alors la MSAPE 3 déjà constituée.

II.10.1 Présentation des machines MSAPE 1, MSAP 2, MSAP 3

Comme annoncé précédemment, la figure II-14 suivante montre les vues en coupe des trois machines dans l'ordre : MSAPE 1, MSAPE 2 et MSAPE 3. Elles sont caractérisées par :

- **MSAPE 1 :**
 - Cette machine comporte une seule couche d'aimants, placée proche de l'arbre de la machine.
- **MSAPE 2 :**
 - Cette machine comporte deux couches d'aimants. La première couche est identique à celle de la MSAPE 1. Une seconde couche d'aimants est ajoutée, séparée de la première par 5 mm.
- **MSAPE 3 :**
 - Cette machine comporte trois couches d'aimants. Elle est obtenue à partir de la MSAPE 2, en ajoutant une troisième couche supplémentaire, également séparée des précédentes par 5 mm. La dernière couche est proche de l'entrefer de la machine.

Ces configurations permettent d'étudier l'influence du nombre de couches d'aimants et de leur disposition sur les performances des machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE).

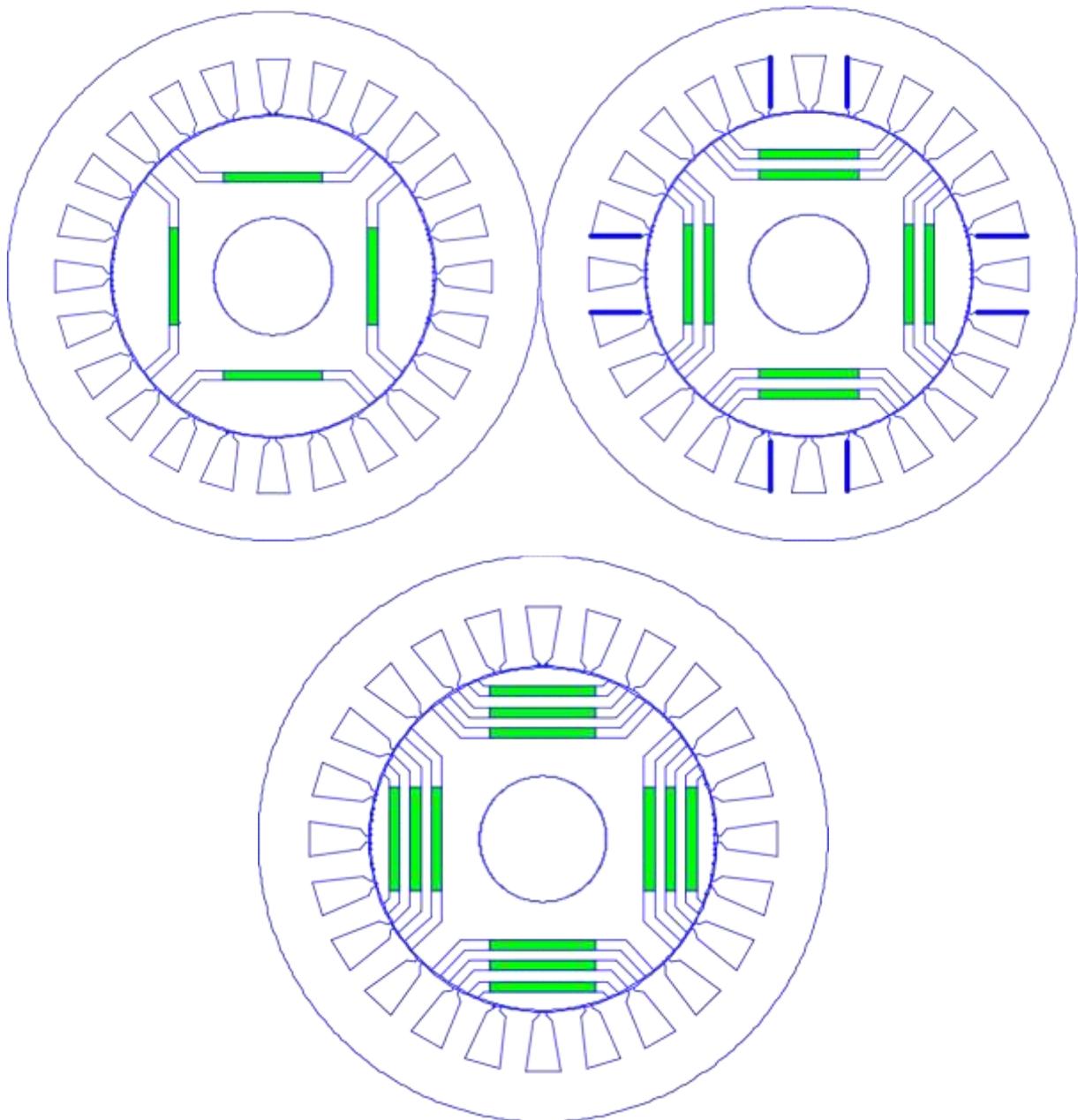


Figure II.5 Vue en coupe des MSAP 1, MSAP 2 et MSAP 3

II.10.2 Présentation machines MSAPE 4, MSAPE 5

Comme annoncé précédemment, la figure II-14 montre les vues en coupe des deux machines dans l'ordre : MSAPE 4 et MSAPE 5. Elles sont caractérisées par :

- **MSAPE 4 :**
 - Cette machine comporte une seule couche d'aimants, placée près de l'entrefer de la machine.
- **MSAPE 5 :**

- Cette machine comporte deux couches d'aimants. La première couche est identique à celle de la MSAPE 4. Une seconde couche d'aimants est ajoutée, séparée de la première par 5 mm. Si l'on ajoute une autre couche à la MSAPE 5, on obtient alors la configuration de la MSAPE 3 déjà constituée.

Ces configurations permettent d'étudier l'influence du nombre de couches d'aimants et de leur disposition sur les performances des machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE).

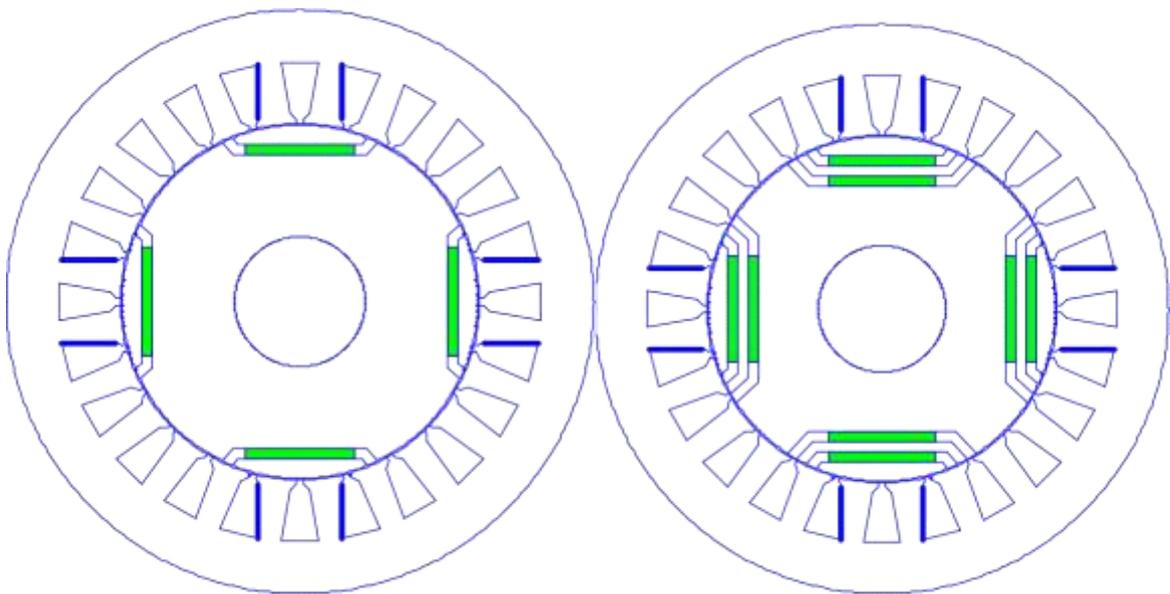


Figure II.6 Vue en coupe de la MSAP 4 et MSAP 5

II.11 Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre l'étude de la machine synchrone à aimants permanents enterrés multicouches par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel FEMM. Grâce à cette méthode, le logiciel FEMM offre la possibilité, de résoudre les équations du champ électromagnétique de la machine d'étude de visualiser différentes performances de la machine en utilisant le post processeur du logiciel.

Dans ce chapitre, nous avons défini la structure de la machine synchrone à aimants permanents enterrés (MSAPE) et les structures des machines étudiées avec différents niveaux de couches d'aimants.

Nous avons présenté plusieurs configurations distinctes de machines MSAPE, qui se distingue par le nombre de couches d'aimants et leur disposition. Ces configurations différentes seront étudiées en détail dans le chapitre suivant, afin de mieux comprendre leur influence sur les performances des machines.

CHAPITRE III

Détermination et Analyse des Caractéristiques Statiques de la MSAPE

CHAPITRE III : DÉTERMINATION ET ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES STATIQUES DE LA MSAPE

III.1 Introduction

La modélisation est une méthode fréquemment employée pour évaluer les performances des systèmes électriques. Il est très avantageux de disposer d'un environnement de simulation qui permet d'intégrer divers phénomènes physique et contraintes au modèle étudié. C'est grâce à cela que le domaine de la robotique et des machines a beaucoup évolué et est arrivé au stade où il en est.

Dans ce dernier chapitre, nous nous proposons d'analyser par éléments finis les différentes configurations de la machine synchrone à aimants permanents enterrés (MSAPE).

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement de la machine synchrone à aimants permanents enterrés avec ses différents niveaux de couches d'aimants et leurs dispositions. Ces configurations permettent d'analyser l'influence du nombre de couches d'aimants et de leur disposition sur les performances des MSAPE. Nous déterminerons les flux magnétiques, les inductions magnétiques, et les couples de détente pour chaque configuration à l'aide du logiciel FEMM. Une étude comparative des différentes machines en termes d'induction, de flux magnétique et de couple de détente sera menée à la fin du chapitre.

III.2 Détermination des caractéristiques statiques des différentes configurations de la MSAPE.

Le bobinage statorique n'étant pas alimenté, on s'intéresse dans ce cas à l'induction dans l'entrefer, le flux magnétique par phase ainsi qu'au couple de détente des différentes configurations de la MSAPE.

III.2.1 MSAPE 1

Dans cette variante notre machine, la MSAPE1 présente une seule couche d'aimants, placée proche de l'arbre de la machine.

- a) Carte des lignes de champs.

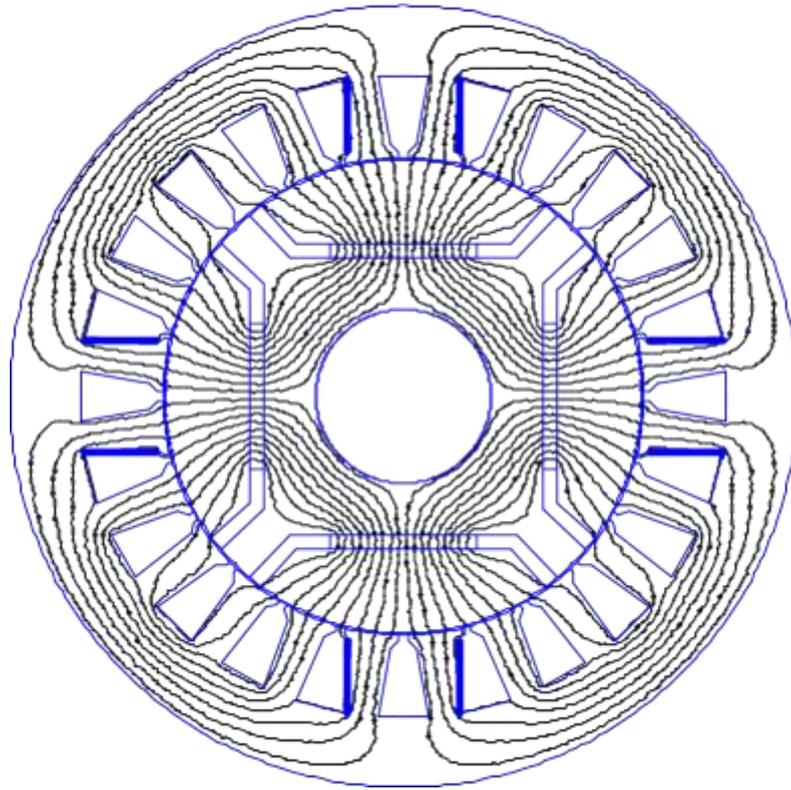


Figure III.1 Configuration des lignes de flux magnétique (MSAPE1).

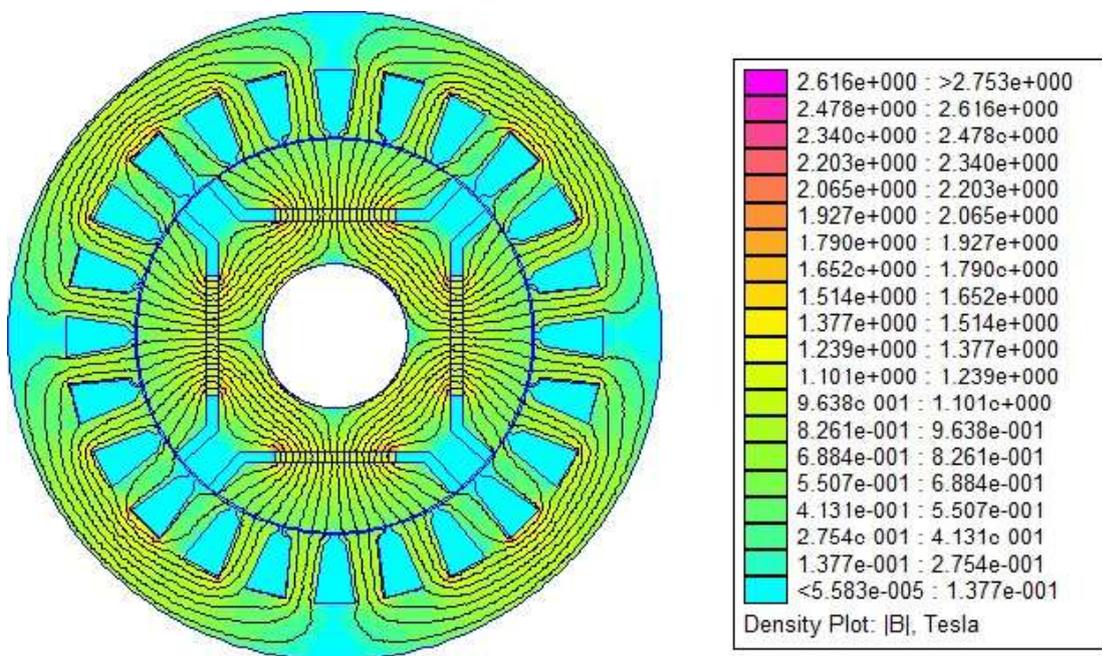


Figure III.2 Carte d'induction magnétique (MSAPE1).

Les Figure (III.1) et III.2) illustrent le tracé des lignes de champ magnétique généré par la couche d'aimants permanents en présence. On peut clairement distinguer que le trajet des lignes de champ à l'intérieur du rotor est influencé par l'espace d'air existant entre les pôles. La majorité des lignes de champ se ferment en empruntant le chemin le plus perméable. Elles traversent l'entrefer du rotor vers le stator, atteignant ainsi le stator par le biais des dents statoriques.

b) Flux magnétique engendré dans les trois phases.

En faisant tourner le rotor par pas de 5° , on relève à chaque fois, à partir du logiciel FEMM, le flux magnétique, engendré dans chacune des 3 phases de la machine.

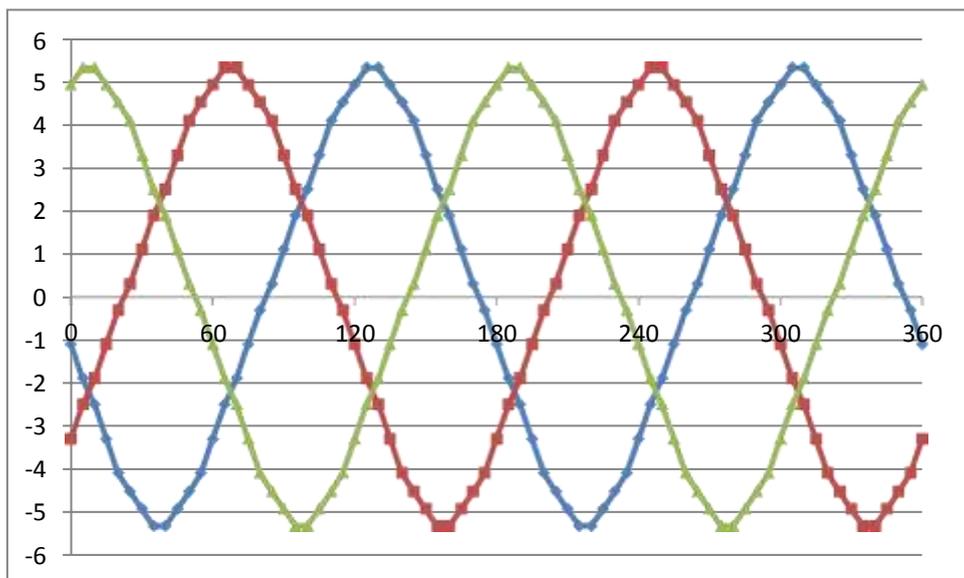


Figure III.3 Forme d'onde des flux magnétiques des trois phases (MSAPE1).

Cette figure représente le flux magnétique des trois phases de la machine. La forme d'onde de chacune des courbes est proche de la sinusoïde. L'amplitude maximale est d'environ 5,31 Wb. Nous distinguons, pour chaque phase, quatre alternances correspondant aux quatre pôles de la machine.

c) Distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer

En plaçant un contour fermé au milieu de l'entrefer, nous relevons, à l'aide du logiciel FEMM, le graphe de l'induction magnétique le long de l'entrefer.

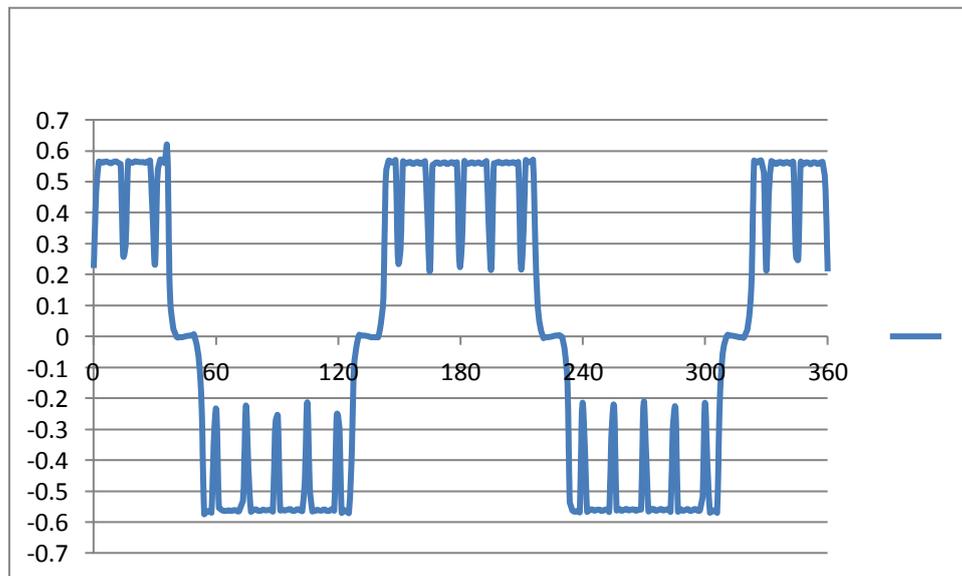


Figure III.4 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer (MSAPE1).

Cette figure III.4 illustre l'induction magnétique dans l'entrefer. On observe une courbe de forme trapézoïdale avec un maximum de 0.565 tesla

d) Couple de détente de la MSAPE 1

En faisant tourner le rotor par pas de 5° , on relève à chaque fois, à partir du logiciel FEMM, le couple de détente.

Ce couple est dû à l'interaction entre les aimants permanents présents dans le rotor et les dents statorique qui leurs font face.

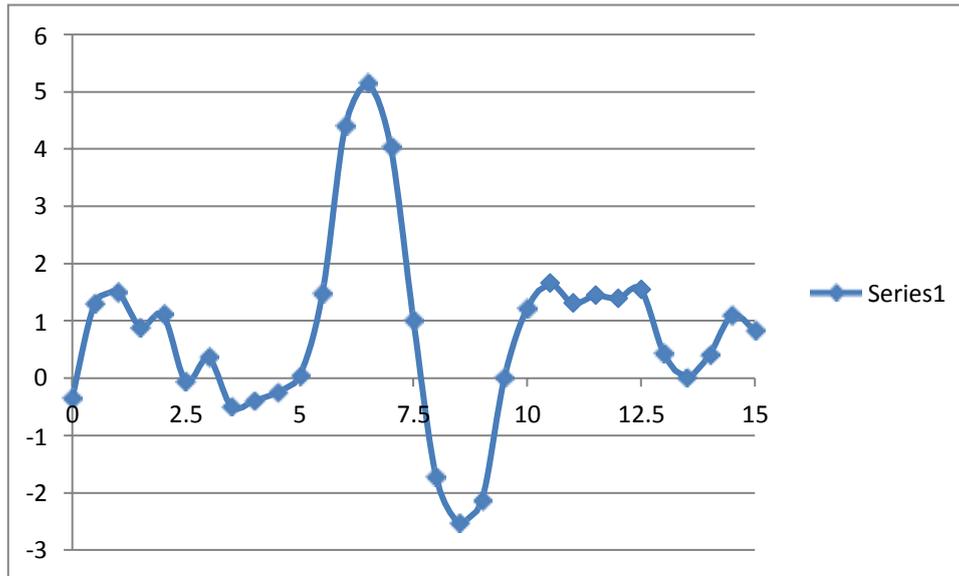


Figure III.5 évolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE1).

Ce couple ainsi obtenu présente pour la MSAPE 1 une amplitude faible et une périodicité de 90° géométrique.

III.2.2 MSAPE 2

Dans cette variante notre machine possède deux couches d'aimants : la première étant celle de la MSAPE 1 avec une seconde couche ajoutée, séparée de la précédente par 5 mm.

a) Carte des lignes de champs.

La carte du champ magnétique est représentée par la figure III.6

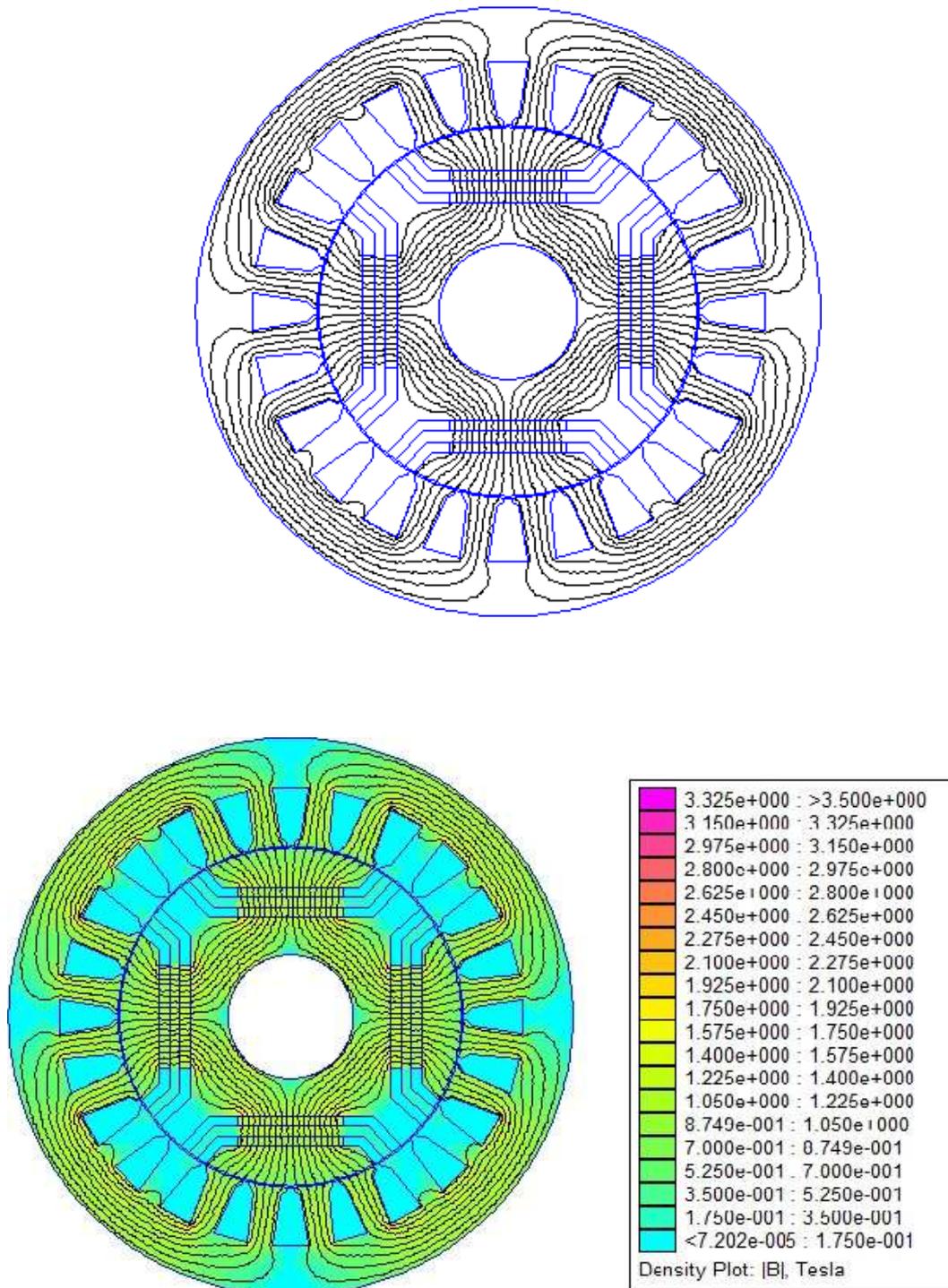


Figure III.6 Carte d'induction magnétique (MSAPE2).

Comparée à la MSAPE 1, les lignes de champ dans la MSAPE 2 se resserrent, en raison de l'existence de deux barrières de flux (les parties aériennes du rotor), et n'empreintes que quatre dents du stator. En revanche, dans le cas de la MSAPE 1, l'existence d'une seule barrière de flux (l'air du rotor) fait que les lignes de champ empreintes six dents du stator.

b) Flux magnétique engendré dans les trois phases.

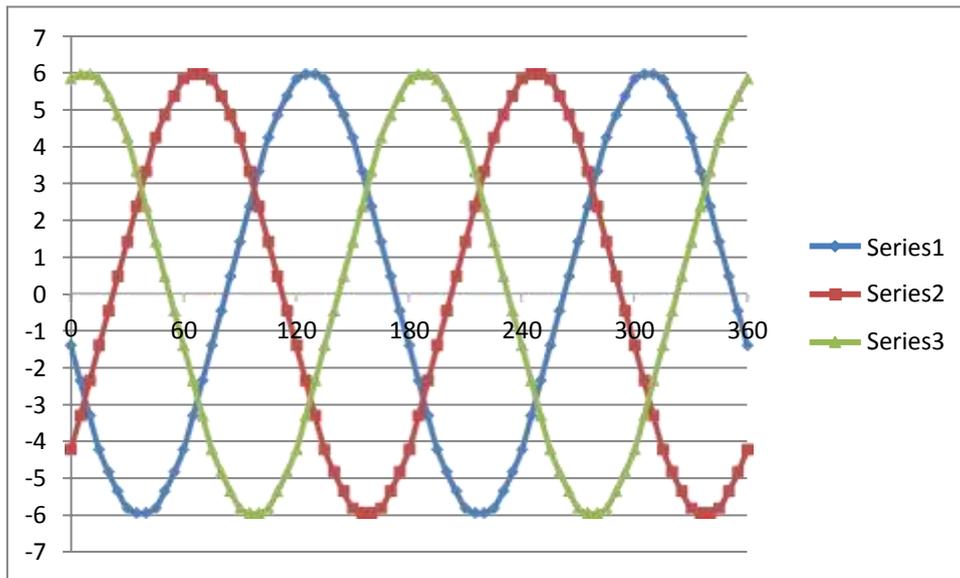


Figure III.7 Forme d'onde des flux magnétique des trois phases (MSAPE2).

Cette figure représente les courbes des flux magnétiques des trois phases. On remarque que ces courbes ont des formes sinusoïdales avec un maximum de 5.94 (Wb)

c) Distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer

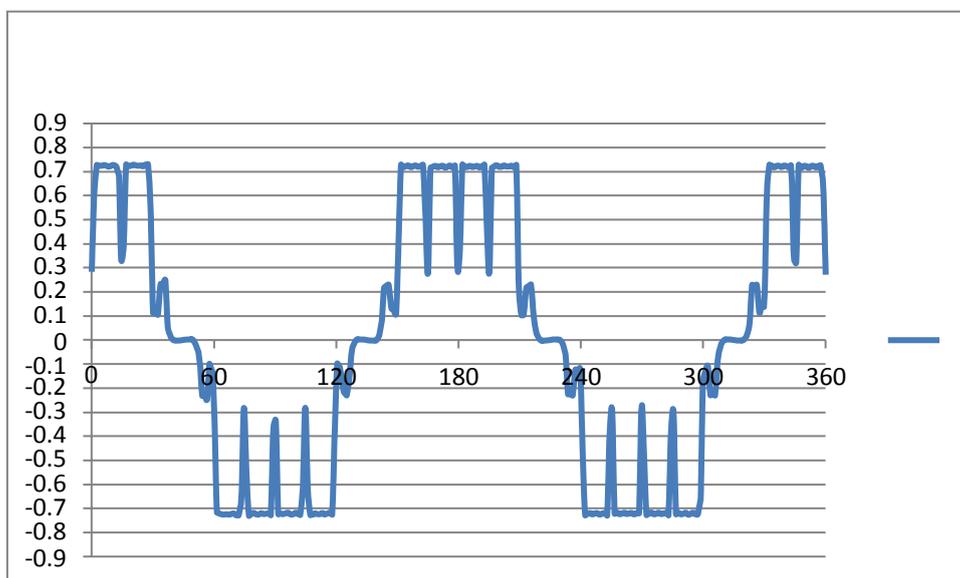


Figure III.8 distribution spatiale de l'induction électromagnétique de l'entrefer (MSAPE2).

La courbe illustré dans la figure III.8 représente l'induction magnétique dans l'entrefer elle est de forme trapézoïdale avec une amplitude de 0.71 tesla. Elle était de 0.565 Tesla pour la MSAPE 1. Soit une augmentation de 0.145 Tesla.

d) Couple de détente de la MSAPE 2

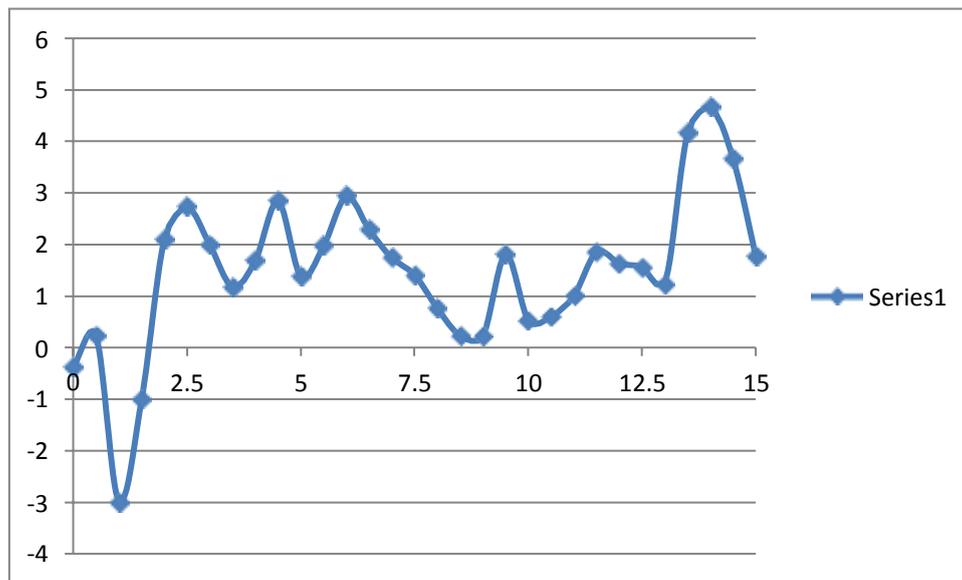


Figure III.9 évolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE2).

Ce couple de détente obtenu pour la MSAPE 2 présente une amplitude toujours faible, mais plus grande que pour la MSAPE 1, et une périodicité de 90° géométrique.

III.2.3 MSAPE 3

Dans cette variante notre machine possède 3 couches d'aimants, obtenue à partir de la MSAPE 2 avec une troisième couche supplémentaire, séparée des précédentes par 5 mm, proche de l'entrefer.

a) Carte des lignes de champs.

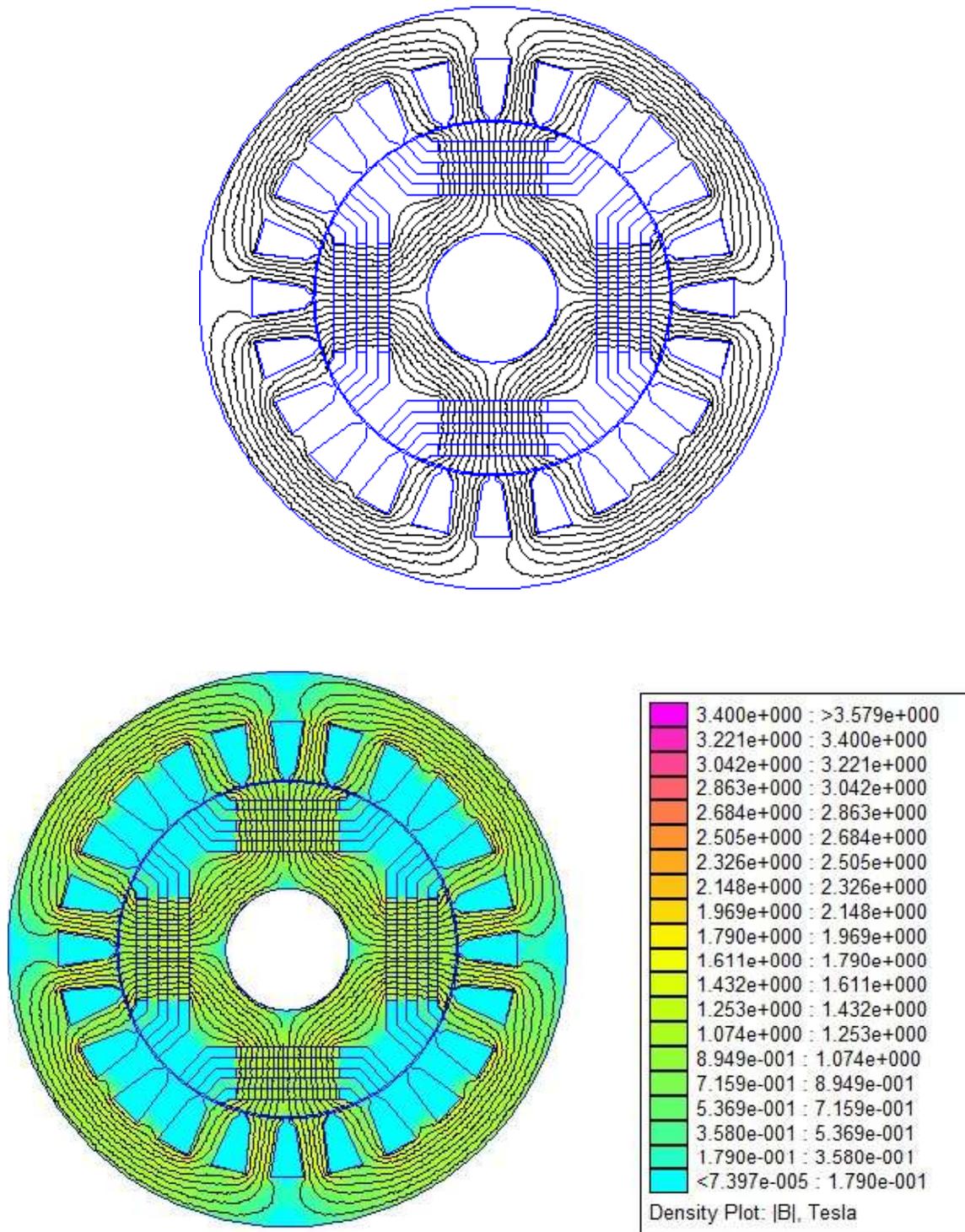


Figure III.10 Carte d'induction magnétique (MSAPE3).

Les lignes de champ magnétique, pour passer du rotor vers le stator, empruntent un chemin plus serré que dans les cas des machines précédentes

b) Flux magnétique engendré dans les trois phases.

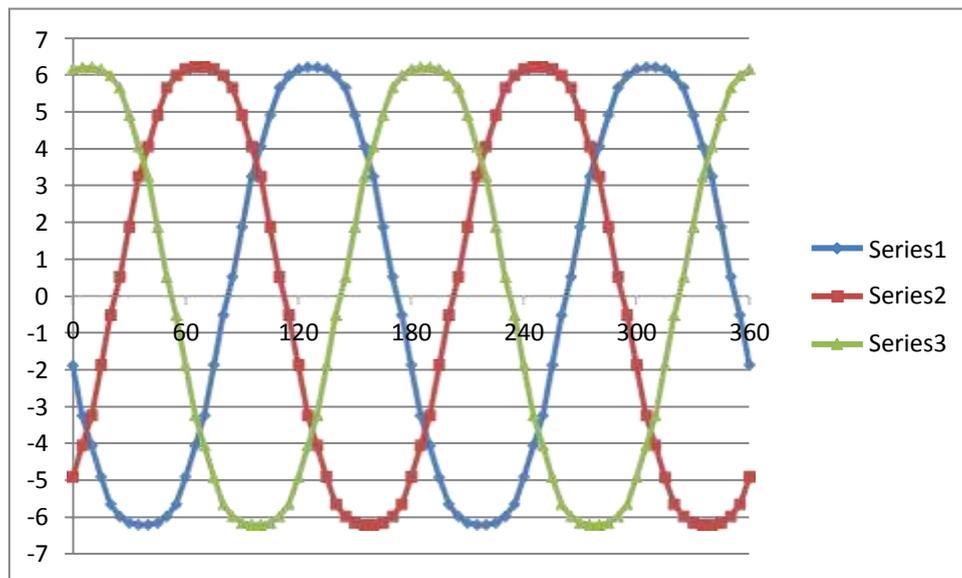


Figure III.11 forme d'onde des flux magnétique des trois phases (MSAPE3).

Dans le cas de la MSAPE 3, les flux magnétiques des trois phases ont des formes sinusoïdales, déphasées les unes par rapport aux autres d'un angle de $120^\circ/p$ soit 60° . L'amplitude maximale est augmentée et atteint 6,2 Wb.

c) Distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer

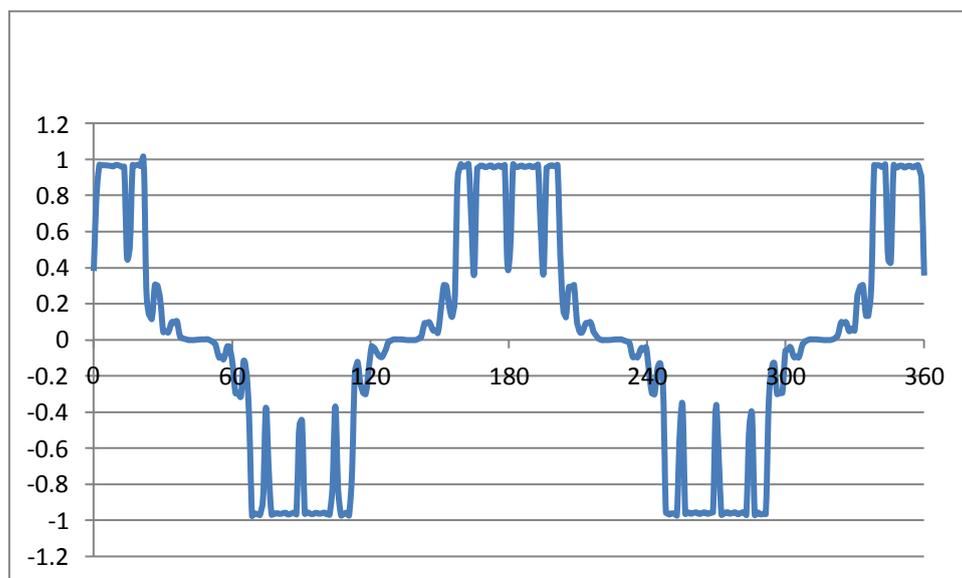


Figure III.12 distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer (MSAPE3).

La figure III.12 représente l'induction magnétique dans l'entrefer. Elle est de forme trapézoïdale avec une amplitude de 0.96 tesla. Elle était de 0.565 Tesla pour la MSAPE 1 et 0.71 Pour la MSAPE 2. Soit une augmentation de 0.395 Tesla.

d) Couple de détente de la MSAPE 3

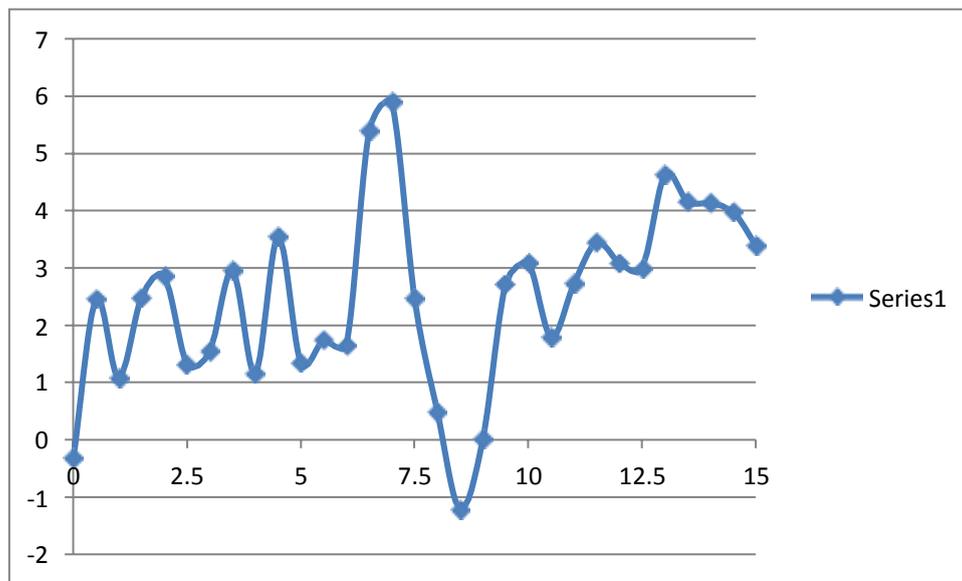


Figure III.13 évolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE3).

Le couple de détente pour la MSAPE 3 a augmenté. Il atteint des pics de 5.9 Nm. Ledouble de celui de la MSAPE 2.

III.2.4 MSAPE 4

Dans cette variante notre machine a une seul couche d'aimant proche de l'entrefer

a) Carte des lignes de champs.

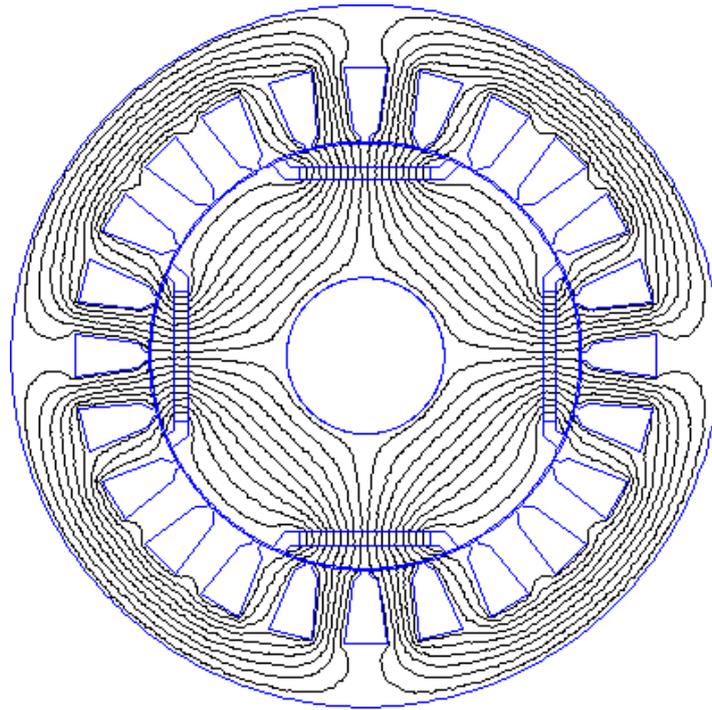


Figure III.14 Configuration des lignes de flux magnétique (MSAPE4).

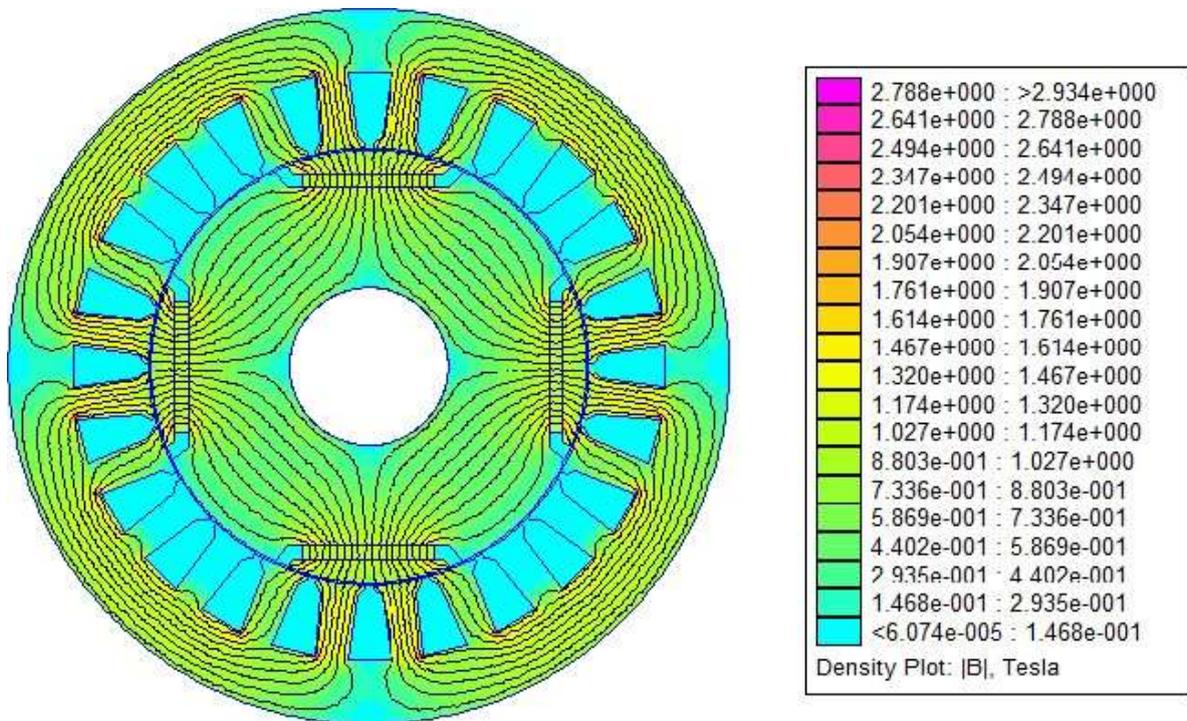


Figure III.15 Carte d'induction magnétique (MSAPE4).

Du fait que l'aimant est proche de l'entrefer, le trajet des lignes de champs est rétréci comparée à la MSAPE 1.

b) Flux magnétique engendré dans les trois phases.

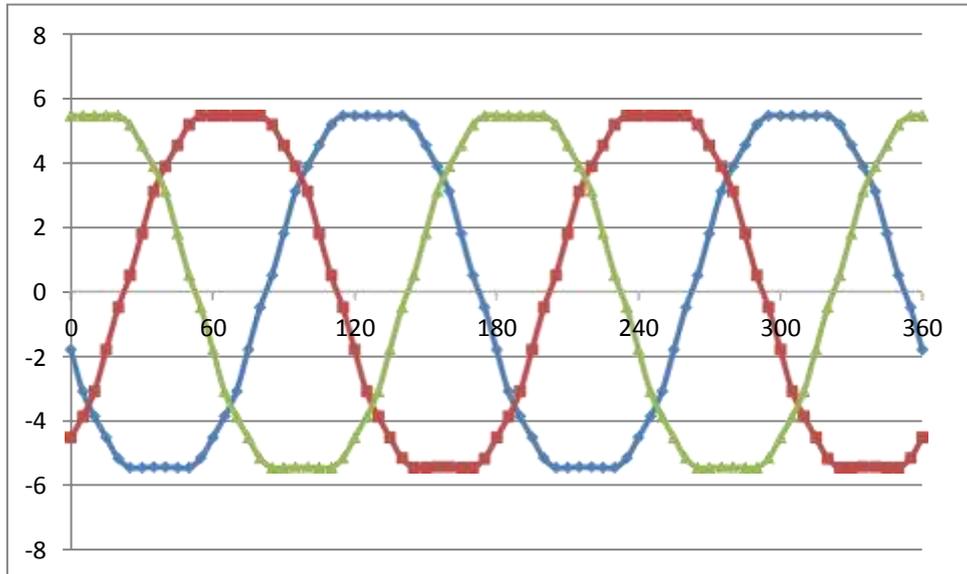


Figure III.16 Forme d'onde des flux magnétique des trois phases (MSAPE4).

Dans ce cas-ci, le flux max obtenu est de l'ordre 5.43 Wb.

c) Distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer

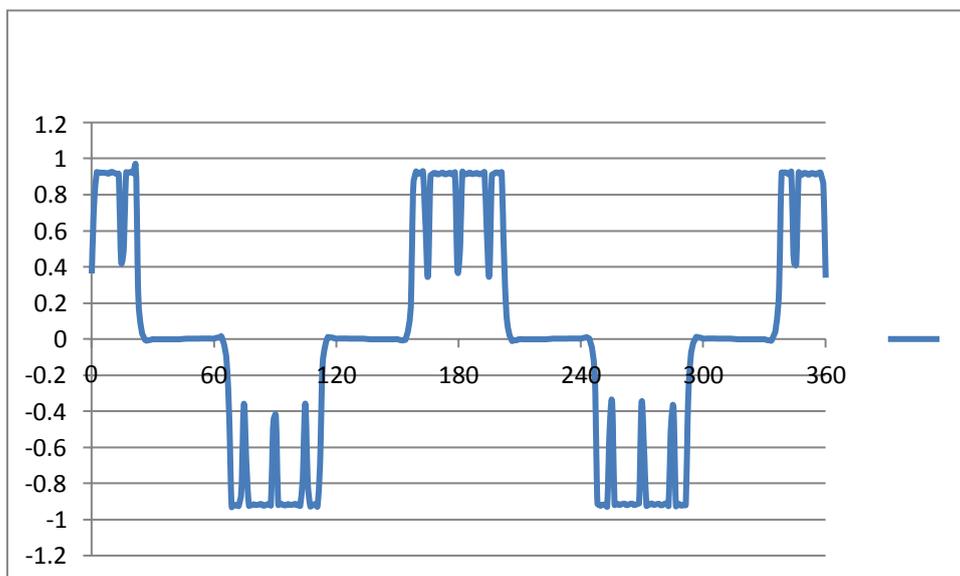


Figure III.17 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer (MSAP4).

L'onde de l'induction est carrée et le max de B est de l'ordre de 0.92 T

d) Couple de détente de la MSAPE 4

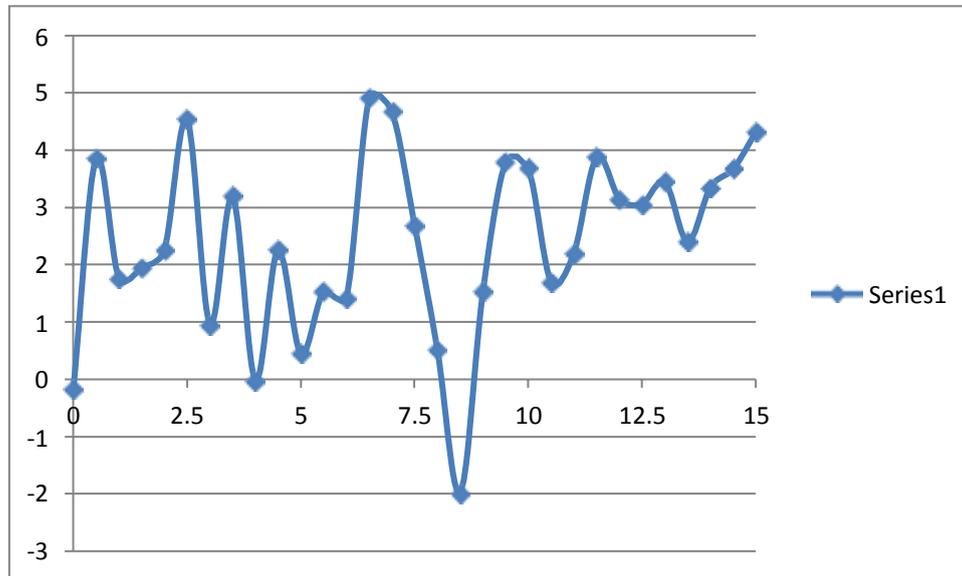


Figure III.18 évolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE4).

Le couple de détente max obtenu pour cette machine est de l'ordre de 5 N-m

III.2.5 MSAPE 5

Dans cette variante notre machine possède deux couches d'aimants proche de l'entrefer.

a) Carte des lignes de champs.

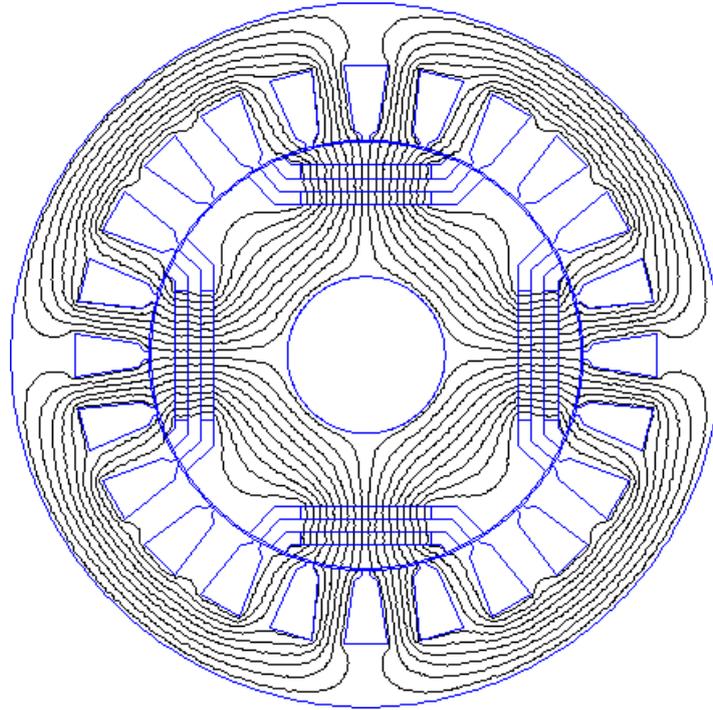


Figure III.19 Configuration des lignes de flux magnétique (MSAPE5).

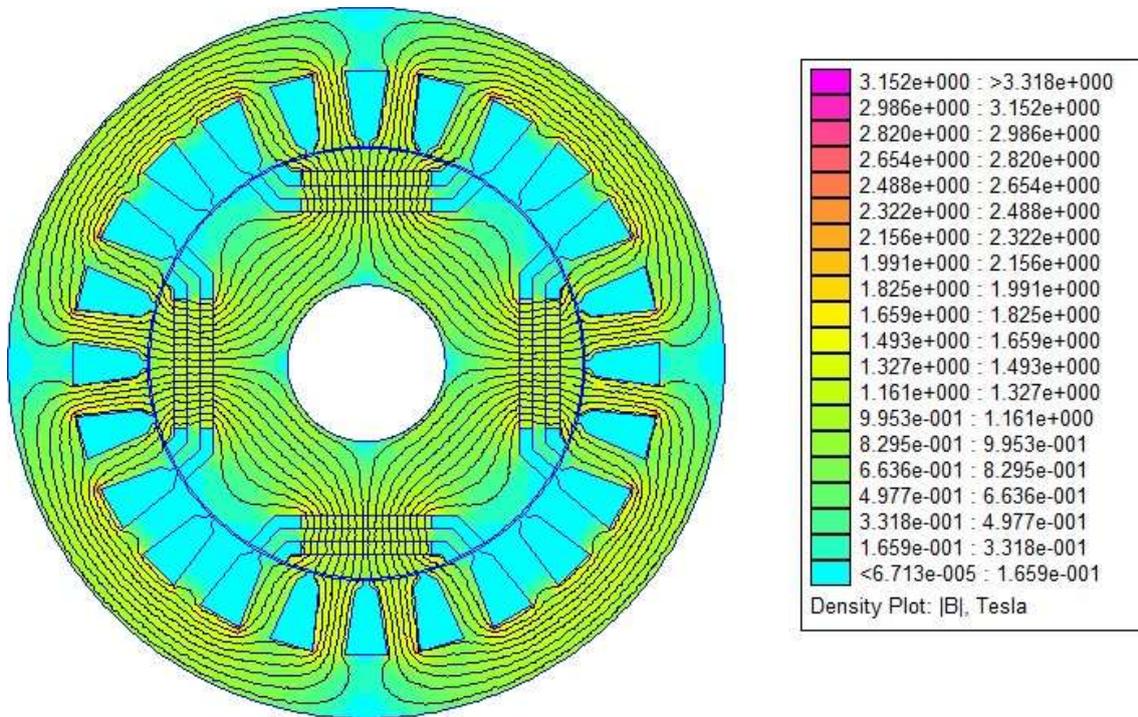


Figure III.20 Carte d'induction magnétique (MSAPE5).

b) Flux magnétique engendré dans les trois phases.

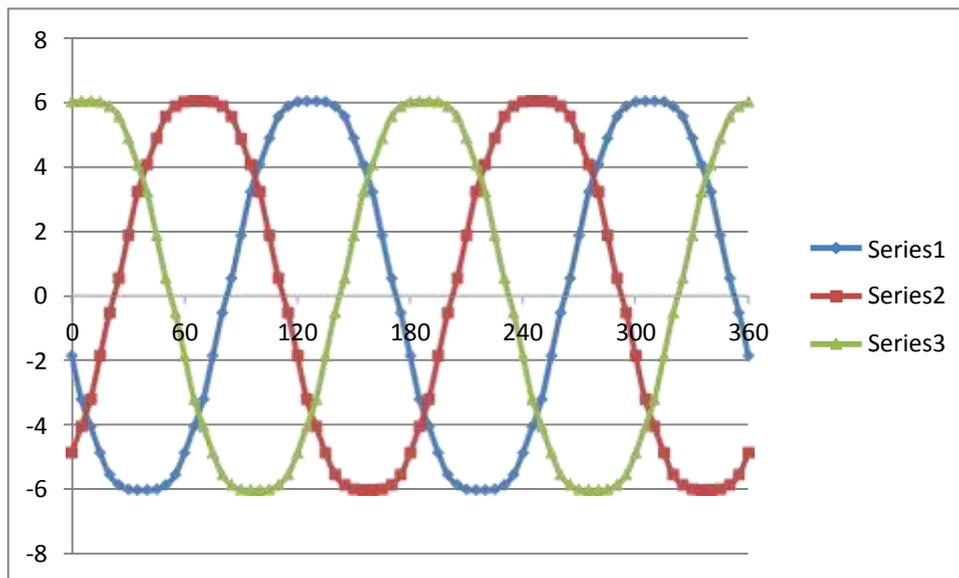


Figure III.21 Forme d'onde des flux magnétiques des trois phases (MSAPE5).

Le max du flux obtenu est de l'ordre de 6.02 T

c) Distribution spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer

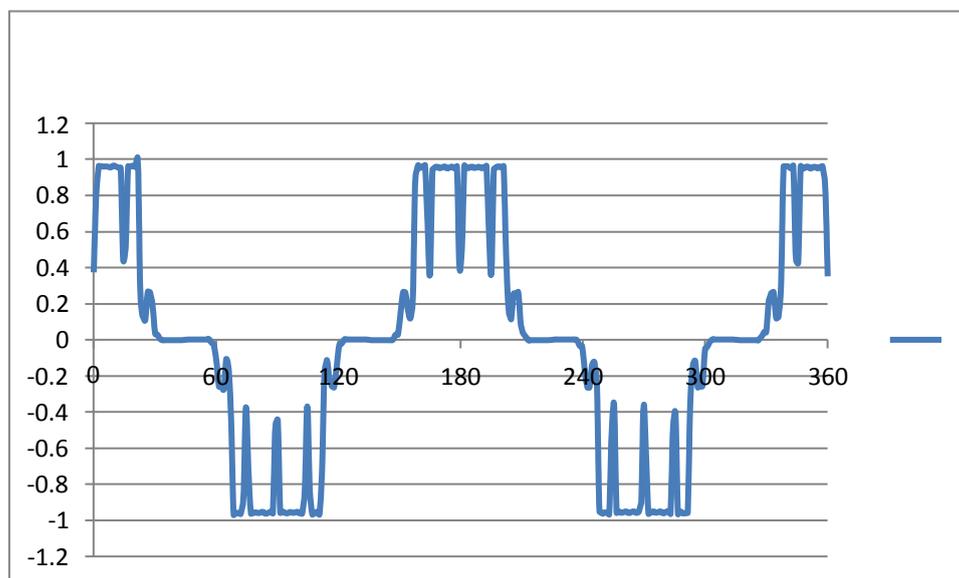


Figure III.22 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer (MSAPE5).

Pour la MSAPE 5 , B_{max} est 0.95 T

d) Couple de détente de la MSAPE 5

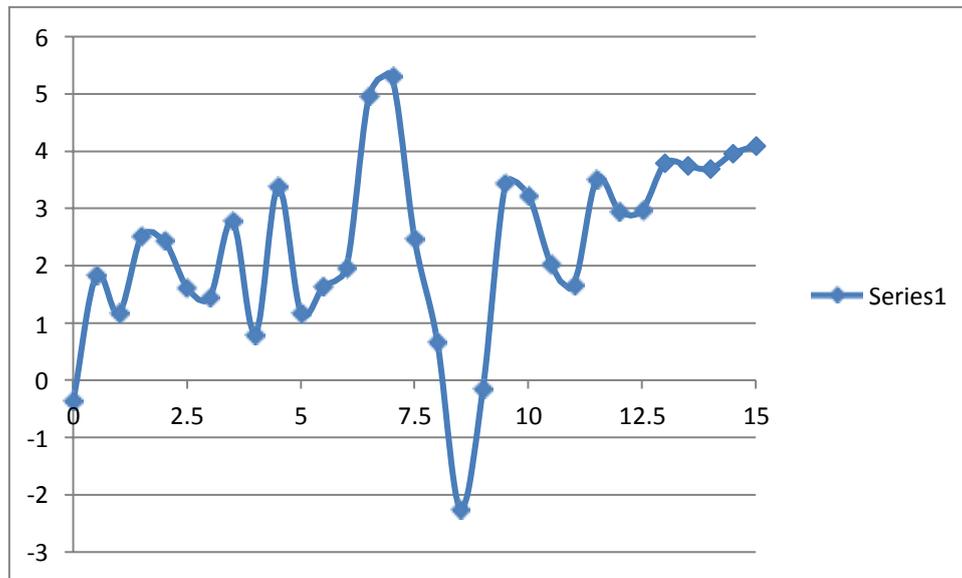


Figure III.23 évolution du couple de détente (N-m) en fonction de la position du rotor (MSAPE5).

Le couple de détente max obtenu pour cette machine est de l'ordre de 5.3 N-m

III.3 Comparaison des performances des différentes configurations de la MSAPE

III.3.1 Flux magnétique dans une phase

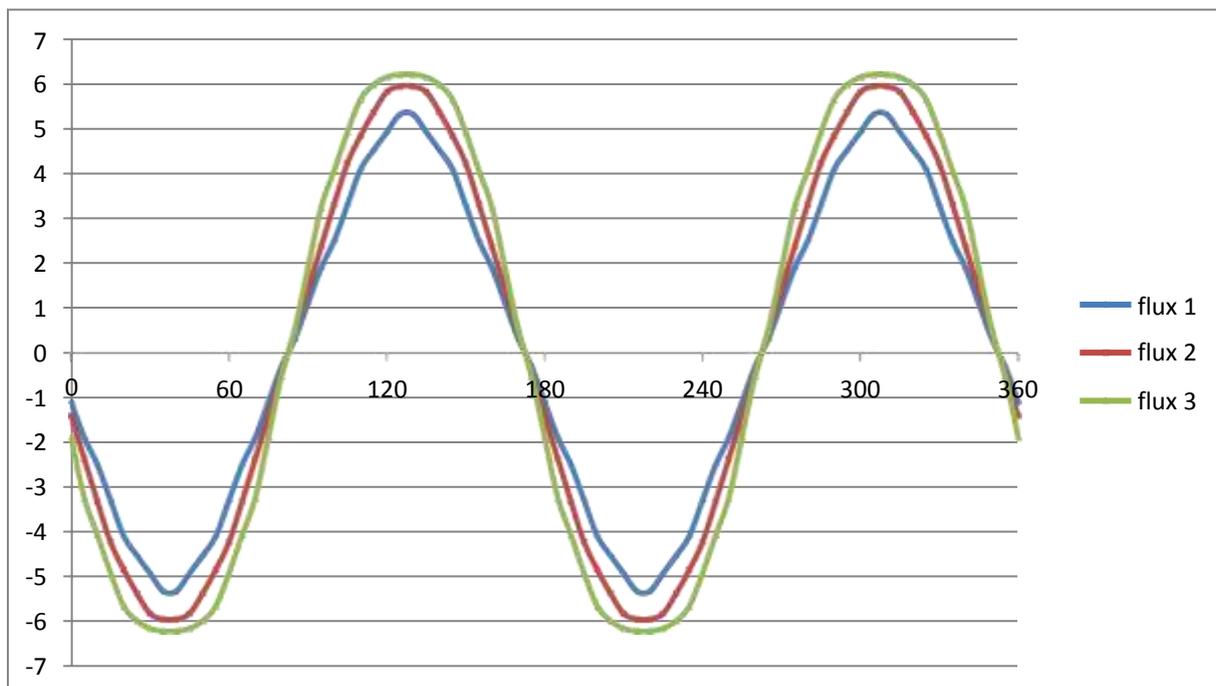
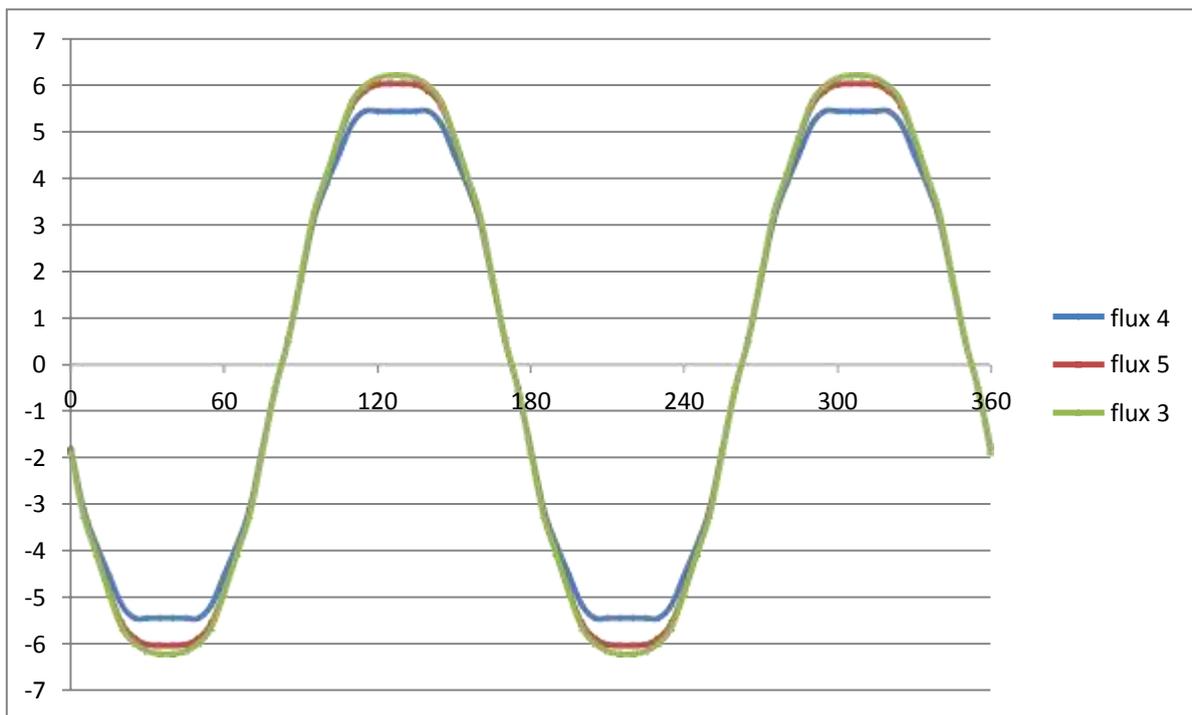


Figure III.24 Flux magnétique des machines MSAPE 1, MSAPE 2 et MSAPE 3.

D'après la figure précédente, les formes d'ondes des flux magnétiques générés dans chacune des trois machines (MSAPE 1, MSAPE 2 et MSAPE 3) sont presque identiques, avec des différences notables dans leurs amplitudes maximales : 5.31 Wb pour la MSAPE 1, 5.94 Wb pour la MSAPE 2 et également 6.2 Wb pour la MSAPE 3. On observe que l'augmentation du nombre de couches d'aimants entraîne une augmentation de l'amplitude du flux magnétique et rapproche l'onde du flux de la sinusoïde.

**Figure III.25** Flux magnétique des MSAPE 4, MSAPE 5 et MSAPE 3.

Les courbes illustrées dans la Figures III.24 et la figure III.25 montrent l'influence de chaque couche d'aimant ajouté au rotor sur le flux magnétique. Les courbes sont en forme de sinusoïde. On observe que l'amplitude du flux augmente pour chaque couche ajouté.

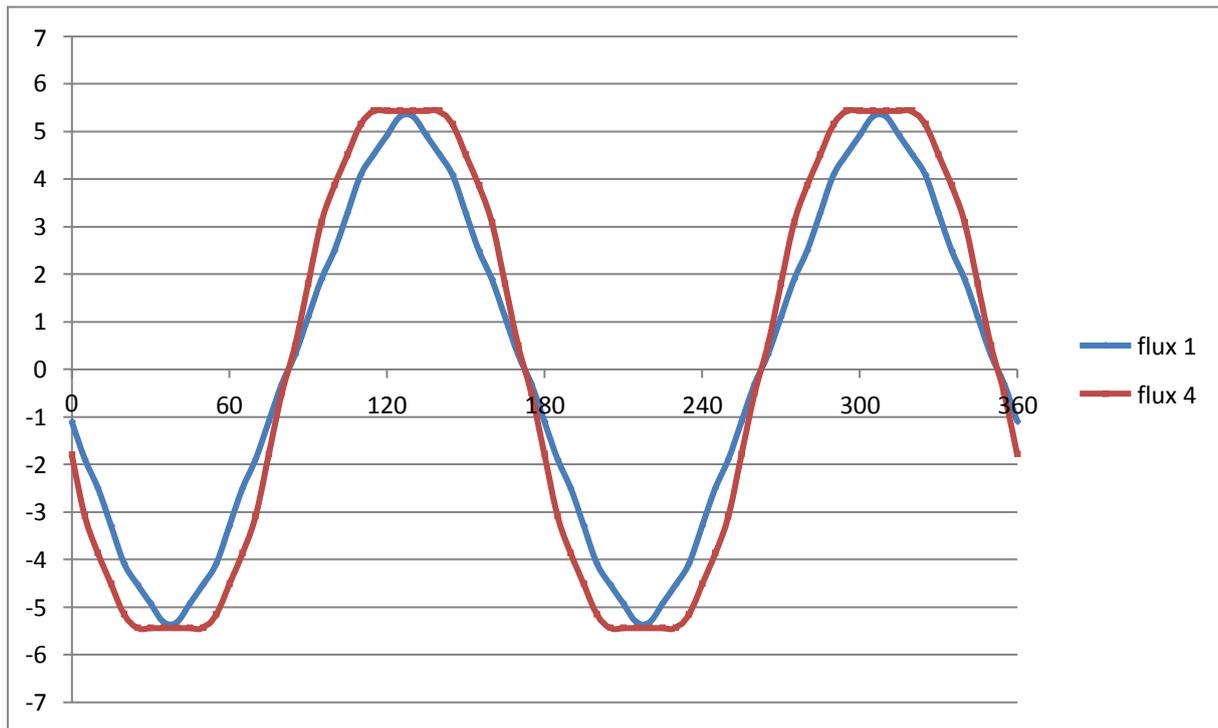


Figure III.26 Flux magnétique des différentes machines (MSAPE1, MSAPE4).

La Figure III.26 représente le flux magnétique d'une phase des machines MSAPE 1 et MSAPE 4, qui comportent chacune une seule couche d'aimants, l'une disposée proche de l'arbre et l'autre proche de l'entrefer. On remarque que les deux courbes ont la même amplitude, mais la pente de la courbe du flux magnétique de la MSAPE 1 est plus raide que celle de la MSAPE 4. On peut donc dire que la disposition des aimants dans la MSAPE 4 offre une meilleure distribution du flux que dans la MSAPE 1.1.

III.3.2 Induction électromagnétique

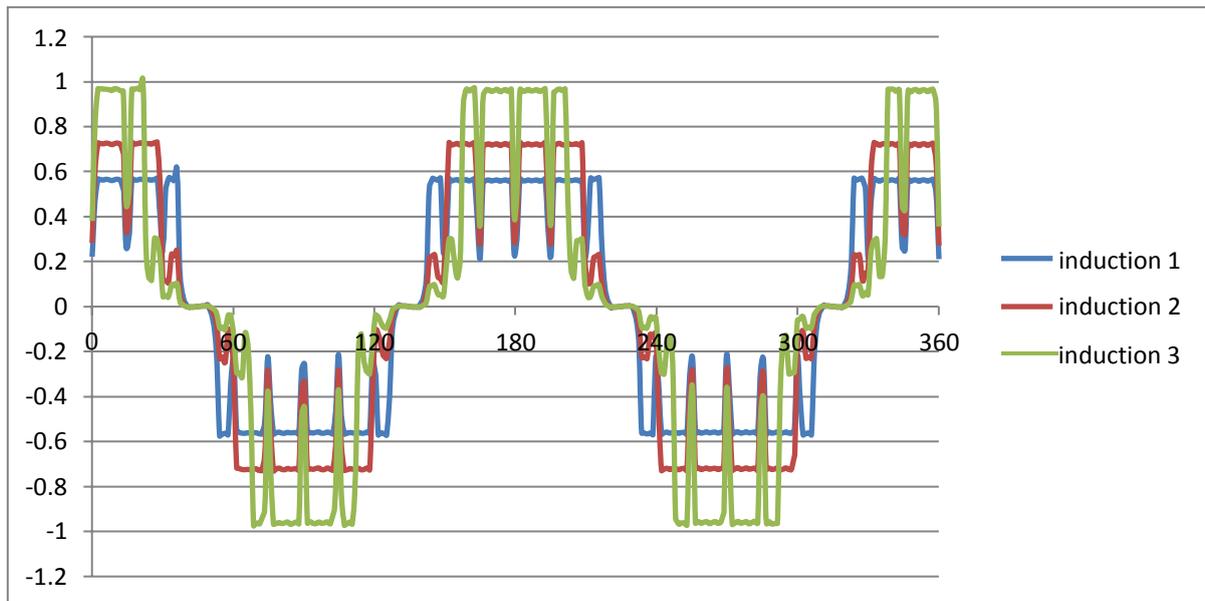


Figure III.27 Induction électromagnétique des différentes machines (MSAPE1,MSAPE2, MSAPE3).

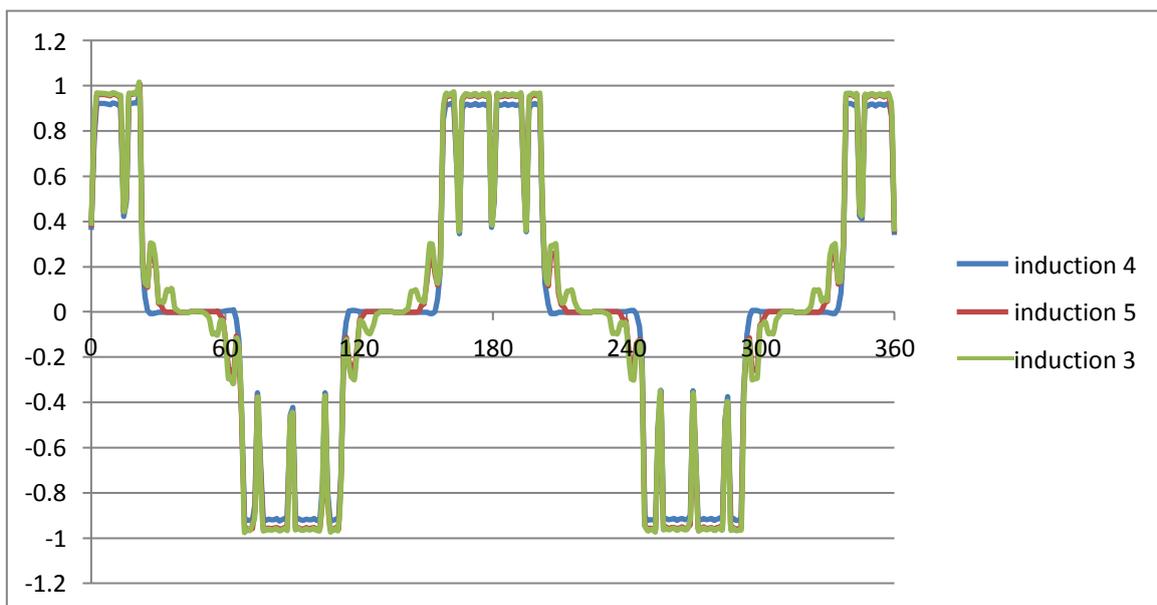


Figure III.28 Induction électromagnétique des différentes machines (MSAPE4, MSAPE5, MSAPE3)

Les courbes illustrées dans les figures III.27 et III.28 représentent l'induction dans l'entrefer des différentes machines. On observe que le nombre de couches d'aimants influe sur l'amplitude des inductions et la largeur des courbes. Plus le nombre de couches augmente, plus l'amplitude de l'induction augmente et plus la largeur des courbes diminue pour les

MSAPE 1, MSAPE 2 et MSAPE 3. Cependant, la largeur de la courbe reste inchangée dans les configurations proches de l'entrefer, à savoir les MSAPE 4 et MSAPE 5.

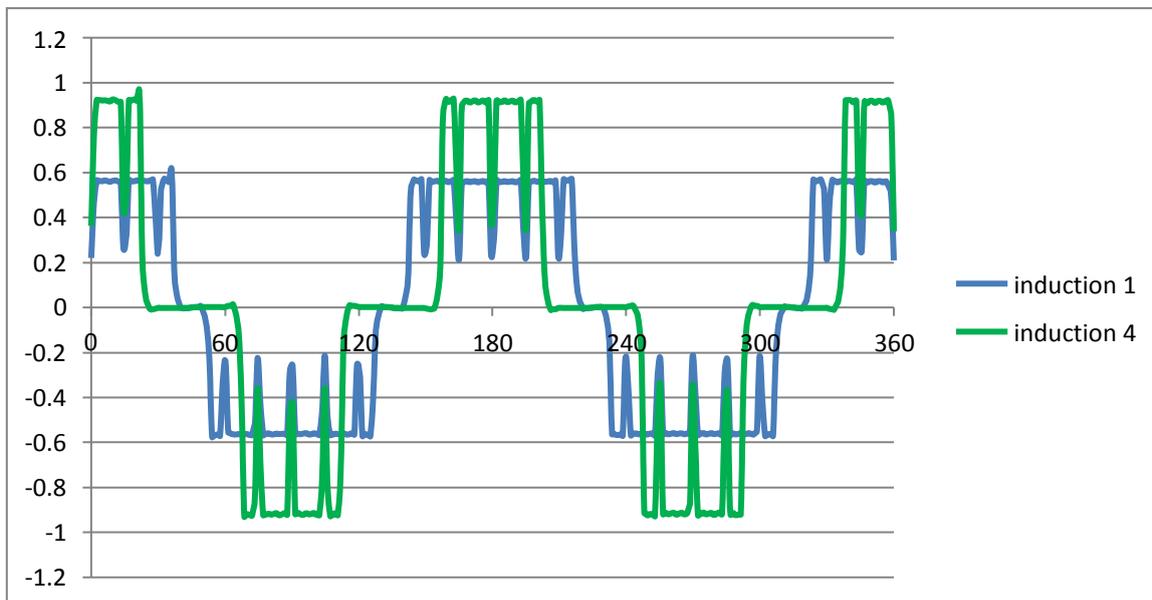


Figure III.29 Induction électromagnétique des différentes machines (MSAPE1,MSAPE4).

La figure III.29 illustre les courbes d'induction de la machine MSAPE 1 et MSAPE 4, qui présentent une forme trapézoïdale. On remarque que l'amplitude de l'induction dans l'entrefer de la MSAPE 4, où l'aimant est disposé près de l'entrefer, est plus grande que celle de la MSAPE 1, où l'aimant est proche de l'arbre.

III.3.3 Constatation

D'après les comparaisons effectuées sur les figures précédentes, on peut déduire que :

- Le nombre de couches d'aimants influe sur les performances de la machine : plus le nombre de couches est élevé, meilleures sont les performances de la machine.
- La disposition des aimants influe également sur les performances de la machine : lorsque les aimants sont proches de l'entrefer, la machine présente de meilleures caractéristiques.

III.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'analyse par éléments finis des différentes configurations de la machine synchrone à aimants permanents enterrés (MSAPE). À travers l'utilisation du

Logiciel FEMM, nous avons exploré les variations des flux magnétiques, des inductions magnétiques dans l'entrefer, ainsi que les couples de détente pour chaque configuration étudiée.

Nous avons observé que le nombre de couches d'aimants et leur disposition jouent un rôle crucial dans les performances des MSAPE. En augmentant le nombre de couches d'aimants, nous avons constaté une augmentation significative des amplitudes de flux magnétique, indiquant une meilleure efficacité magnétique globale. De plus, la proximité des aimants par rapport à l'entrefer a montré des améliorations notables dans les caractéristiques de la machine, notamment une induction magnétique plus élevée et des courbes de flux plus resserrées.

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en lumière l'importance de l'optimisation de la conception des MSAPE à travers la modélisation par éléments finis. Les résultats obtenus serviront de base pour la sélection et l'optimisation des configurations de machines synchrones à aimants permanents enterrés dans des applications futures.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

À travers ce mémoire, nous avons exploré en profondeur le domaine des machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE), en utilisant la méthode des éléments finis avec le logiciel FEMM pour analyser différentes configurations et performances.

Dans le chapitre 1, nous avons commencé par une étude générale sur les machines synchrones à aimants permanents (MSAP). Nous avons examiné leur constitution, leur classification, ainsi que les configurations des rotors à aimants permanents. En détaillant le principe de fonctionnement des MSAP, nous avons exploré les différents types de couple et leurs caractéristiques spécifiques, tout en abordant les propriétés des aimants utilisés et leurs diverses applications. Nous avons conclu ce chapitre en présentant les avantages et les inconvénients de cette technologie émergente.

Le chapitre 2 a été consacré à l'étude approfondie des MSAPE multicouches par la méthode des éléments finis avec le logiciel FEMM. Nous avons présenté les équations du champ électromagnétique, leur formulation en potentiel vecteur magnétique. Nous avons par la suite présenté le logiciel FEMM que nous avons utilisé pour la résolution des équations de Maxwell, et exploité pour la détermination des caractéristiques statiques de la machine étudiée. Nous avons défini la structure des MSAPE et analysé plusieurs configurations en variant le nombre de couches d'aimants et leur disposition.

Enfin, le chapitre 3 s'est concentré sur l'analyse détaillée par éléments finis des différentes configurations de MSAPE, en mettant en évidence l'influence du nombre de couches d'aimants et de leur disposition sur les performances des machines. Cette analyse nous a permis de visualiser et de comparer les performances magnétiques et électromagnétiques des différentes machines étudiées. Nous avons observé que l'augmentation du nombre de couches d'aimants et la proximité des aimants par rapport à l'entrefer améliorent significativement les caractéristiques magnétiques et électromagnétiques des MSAPE.

En conclusion, cette étude a permis de mieux comprendre les principes de fonctionnement, les avantages et les possibilités d'optimisation des machines synchrones à aimants permanents enterrés. Les résultats obtenus fournissent des bases solides pour l'optimisation et le développement futurs de ces technologies dans diverses applications industrielles, contribuant ainsi à l'avancement du domaine des machines électriques modernes.

- [1] Barret Philippe et al. Régimes transitoires des machines tournantes électriques. 2^e édition revue et corrigée. Paris : Eyrolles, 1987.
- [2] Trad, K. (2021). Commande en vitesse du Moteur Synchrone à Aimants Permanents (Doctoral dissertation).
- [3] Lesenne, J., Notelet, F., & Séguire, G. (1981). Introduction à l'électrotechnique approfondie. Technique et Documentation.
- [4] Bernard, N. (2002). Machine synchrone: de la boucle ouverte à l'autopilotage. Revue 3EI, 30, 24-39.
- [5] Richter, E. (1982). The proper magnet characteristics for industrial PM machines. In Proceedings of Convention (pp. 64-581).
- [6] Richter, E., Miller, T. J., Neumann, T. W., & Hudson, T. L. (1985). The Ferrite Permanent Magnet AC Motor---A Technical and Economical Assessment. IEEE Transactions on Industry Applications, (3), 644-650.
- [7] Haring, T., Forman, K., Huhtanen, T., & Zawadzki, M. (2003, June). Direct drive-opening a new era in many applications. In Conference Record of the 2003 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003. (pp. 171-179). IEEE.
- [8] Aubert, B. (2014). Détection des courts-circuits inter-spores dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents: Méthodes basées modèles et filtre de Kalman étendu (Doctoral dissertation).
- [9] Singh, B., Singh, B. P., & Dwivedi, S. (2006). A state of art on different configurations of permanent magnet brushless machines. Journal-Institution of Engineers India Part EI Electrical Engineering Division, 87, 63.
- [10] Wildi, M. (2005). Signal Extraction: Efficient Estimation, Unit Root'- Tests and Early Detection of Turning Points. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [11] Mena, M., Touhami, O., Ibtouen, R., & Fadel, M. (2008). Sensorless direct vector control of an induction motor. Control Engineering Practice, 16(1), 67-77..
- [12] MABRAK, S., & Abdelmalek, M.A.Y. (2008). Calcul analytique et numérique des machines synchrones à aimants permanents montés sur la surface rotorique. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Ecole national polytechnique.
- [13] Fonseca, A. (2000). Comparaison de machines à aimants permanents pour la traction de véhicules électriques et hybrides (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).

- [14] Henneberger, G., Harer, H., & Schleuter, W. (1986). A new generation of servomotors with rare earth magnets. In Proc. ICEM 86 (p. 1083).
- [15] Richter, E. (1982). The Proper Magnet Characteristics for Industrial PM, Proceedings of Motor Convention (pp. 64-581).

Annexe

```

showconsole()
-- create(doctype)
create(0)
-- Definition du problème à résoudre
-- mi probdef(frequency,units,type,precision,(depth),(minangle))
mi_probdef(0,"millimeters","planar",1e-008,250,10)
-- OPERATION Material librairie
-- mi addmaterial("materialname", mu x, mu y, H c, Jr, Ji, Cduct, Lam d,
Phi hmax,
-- lam fill, LamType, Phi hx, Phi hy)
-- open("mlibrary.dat")
handle = openfile("mlibrary.dat","r")
--
mi_addmaterial("Air",1,1)
mi_addmaterial("AP",1.049,1.049,979000,0,0,0.667,0,0,1,0,0,0)
mi_addmaterial("copper",1,1,0,0,0,58,0,0,1,0,0,0)
mi_addmaterial("Pure Iron",14872,14872,0,0,0,10.44,0,0,1,0,0,0)
-- Définition des conditions aux limites condition de Dirichlet sur les
frontière
-- mi addboundprop("propname", A0, A1, A2, Phi, Mu, Sig, c0, c1,
BdryFormat)
mi_addboundprop("zero", 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
--Définition des bobines des trois phases
--mi addcircprop("circuitname",i_re, i_im, circuittype)
I1=0;
I2=0;
I3=0;
mi_addcircprop("phase A", I1, 0)
mi_addcircprop("phase B", I2,0)
mi_addcircprop("phase C", I3, 0)

xc1=0;
yc1=0;
Xc={}
Yc={}
Xc[1]=xc1      Yc[1]=yc1
mi_addblocklabel( Xc[1], Yc[1])
mi_selectlabel(Xc[1],Yc[1])
mi_setblockprop("<No Mesh>",0,auto, 'None', 0, 0, 'None')
mi_clearselected()
--rotor externe
xre1=81.75; xre2=-81.75;
yre1=0;   yre2=0;
Xre={}
Yre={}
Xre[1]=xre1      Yre[1]=yre1
Xre[2]=xre2      Yre[2]=yre2
for i=1,2 do
mi_addnode( Xre[i],Yre[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(Xre[i],Yre[i])
mi_setnodeprop("None",33)
end

```

```

mi_addarc( Xre[1],Yre[1], Xre[2],Yre[2],180,2)
mi_selectarcsegment(Xre[1],Yre[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 33)
mi_addarc( Xre[2],Yre[2], Xre[1],Yre[1],180,2)
mi_selectarcsegment(Yre[1],Xre[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 33)
-----Données initiales des points
p1, p2
-----
--EPAISSEUR AIMANT
eap=5
--longeur aimant
la=50
-----couche une-----
-----
--espace air aimant
eair1=14.13
eair2=11.95
a1=0
b1=5.78
C=13.31
a2=la/2+eair1
b2=47.875
A=(b2-b1)/a2;
B=b1
R=81.75
A2=A*A
B2=B*B
C2=C*C
R2=R*R
k1=-A*B+sqrt(A2*R2+R2-B2)
k2=-A*C+sqrt(A2*R2+R2-C2)
k1=k1/(A2+1)
k2=k2/(A2+1)
xc1={}
yc1={}
xc1[3]= -la/2 ; yc1[3]= b2
xc1[4]= la/2 ; yc1[4]= b2
xc1[5]= la/2+eair1 ; yc1[5]=b2
xc1[6]= k1 ; yc1[6]=A*k1+B;
xc1[1]= -xc1[6] ; yc1[1]=yc1[6]
xc1[2]= -xc1[5] ; yc1[2]= b2
-----
xc1[9]= xc1[4] ; yc1[9]= yc1[4]+eap
xc1[8]=xc1[9]+eair2 ; yc1[8]= yc1[9]
xc1[10]= xc1[3] ; yc1[10]= yc1[3]+eap
xc1[11]=- xc1[8] ; yc1[11]= yc1[8]
xc1[7]= k2 ; yc1[7]= A*k2+C;
xc1[12]=- xc1[7] ; yc1[12]= yc1[7]

```

```

for i=1,12 do
mi_addnode( xcl[i],ycl[i] )
end
for i=1,12 do
mi_selectnode( xcl[i],ycl[i] )
mi_setnodeprop("None",3)
end

mi_addsegment(xcl[1],ycl[1], xcl[2],ycl[2])
mi_addsegment(xcl[2],ycl[2], xcl[5],ycl[5])
mi_addsegment(xcl[5],ycl[5], xcl[6],ycl[6])
mi_addsegment(xcl[7],ycl[7], xcl[8],ycl[8])
mi_addsegment(xcl[8],ycl[8], xcl[11],ycl[11])
mi_addsegment(xcl[11],ycl[11], xcl[12],ycl[12])
mi_addsegment(xcl[3],ycl[3], xcl[10],ycl[10])
mi_addsegment(xcl[4],ycl[4], xcl[9],ycl[9])

for i=1,11 do
mi_selectsegment(0.5*(xcl[i]+xcl[i+1]),0.5*(ycl[i]+ycl[i+1]));
mi_setsegmentprop("none", 0, automesh, 0, 3)
end
mi_selectsegment(0.5*(xcl[3]+xcl[10]),0.5*(ycl[3]+ycl[10]));
mi_selectsegment(0.5*(xcl[4]+xcl[9]),0.5*(ycl[4]+ycl[9]));
mi_setsegmentprop("none", 0, automesh, 0, 3)
-- Attribution région air autour des aimants.

xair1=38 yair1=50
xair2=-38 yair2=50
xfer=0 yfer=55
Xair={}
Yair={}
Xair[1]=xair1      Yair[1]=yair1
Xair[2]=xair2      Yair[2]=yair2
for i=1,2 do
mi_addblocklabel( Xair[i], Yair[i])
mi_selectlabel(Xair[1],Yair[1])
mi_setblockprop("Air",0,1, 'None',0 , 3, 'None')
end
mi_clearselected()
Xfer={}
Yfer={}
Xfer[1]=xfer      Yfer[1]=yfer
mi_addblocklabel( Xfer[1], Yfer[1])
mi_selectlabel(Xfer[1],Yfer[1])
mi_setblockprop("Pure Iron",0,1.5, 'None',0 , 3, 'None')

mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 90, 3, 4)

-----couche deux-----
-----

--espace air aimant
eair3=9.78

```

```

eair4=7.60
a1=0
b1=20.63
C=27.96
a2=1a/2+eair3
b2=57.875
A=(b2-b1)/a2;
B=b1
R=B1.75
A2=A*A
B2=B*B
C2=C*C
R2=R*R
k1=-A*B+sqrt(A2*R2+R2-B2)
k2=-A*C+sqrt(A2*R2+R2-C2)
k1=k1/(A2+1)
k2=k2/(A2+1)
xc2={}
yc2={}
xc2[3]= -1a/2 ; yc2[3]= b2
xc2[4]= 1a/2 ; yc2[4]= b2
xc2[5]= 1a/2+eair3 ; yc2[5]=b2
xc2[6]= k1 ; yc2[6]=A*k1+B;
xc2[1]= -xc2[6] ; yc2[1]=yc2[6]
xc2[2]= -xc2[5] ; yc2[2]= b2
-----

xc2[9]= xc2[4] ; yc2[9]= yc2[4]+eap
xc2[8]=xc2[9]+eair4 ; yc2[8]= yc2[9]
xc2[10]= xc2[3] ; yc2[10]= yc2[3]+eap
xc2[11]=- xc2[8] ; yc2[11]= yc2[8]
xc2[7]= k2 ; yc2[7]= A*k2+C;
xc2[12]=- xc2[7] ; yc2[12]= yc2[7]

for i=1,12 do
mi_addnode( xc2[i],yc2[i] )
end
for i=1,12 do
mi_selectnode( xc2[i],yc2[i] )
mi_setnodeprop("None",3)
end

mi_addsegment(xc2[1],yc2[1], xc2[2],yc2[2])
mi_addsegment(xc2[2],yc2[2], xc2[5],yc2[5])
mi_addsegment(xc2[5],yc2[5], xc2[6],yc2[6])
mi_addsegment(xc2[7],yc2[7], xc2[8],yc2[8])
mi_addsegment(xc2[8],yc2[8], xc2[11],yc2[11])
mi_addsegment(xc2[11],yc2[11], xc2[12],yc2[12])
mi_addsegment(xc2[3],yc2[3], xc2[10],yc2[10])
mi_addsegment(xc2[4],yc2[4], xc2[9],yc2[9])

for i=1,11 do
mi_selectsegment(0.5*(xc2[i]+xc2[i+1]),0.5*(yc2[i]+yc2[i+1]));
mi_setsegmentprop("none", 0, automesh, 0, 3)

```

```

end
mi_selectsegment(0.5*(xc2[3]+xc2[10]),0.5*(yc2[3]+yc2[10]));
mi_selectsegment(0.5*(xc2[4]+xc2[9]),0.5*(yc2[4]+yc2[9]));
mi_setsegmentprop("none", 0, automesh, 0, 3)
-- Attribution région air autour des aimants.

xair3=34 yair3=60
xair4=-34 yair4=60
xfer2=0 yfer2=65
Xair={}
Yair={}
Xair[1]=xair3 Yair[1]=yair3
Xair[2]=xair4 Yair[2]=yair4
for i=1,2 do
mi_addblocklabel( Xair[i], Yair[i])
mi_selectlabel(Xair[i],Yair[i])
mi_setblockprop("Air",0,1, 'None',0 , 3, 'None')
end
mi_clearselected()
Xfer={}
Yfer={}
Xfer[1]=xfer2 Yfer[1]=yfer2
mi_addblocklabel( Xfer[1], Yfer[1])
mi_selectlabel(Xfer[1],Yfer[1])
mi_setblockprop("Pure Iron",0,1.5, 'None',0 , 3, 'None')

mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 90, 3, 4)

-----couche trois-----
-----
--espace air aimant
eair5=5.43
eair6=3.26
a1=0
b1=35.2843
C=42.6083
a2=1a/2+eair5
b2=67.875
A=(b2-b1)/a2;
B=b1
R=81.75
A2=A*A
B2=B*B
C2=C*C
R2=R*R
k1=-A*B+sqrt(A2*R2+R2-B2)
k2=-A*C+sqrt(A2*R2+R2-C2)
k1=k1/(A2+1)
k2=k2/(A2+1)
xc3={}
yc3={}
xc3[3]= -1a/2 ; yc3[3]= b2
xc3[4]= 1a/2 ; yc3[4]= b2

```

```

xc3[5]= la/2+eair5 ; yc3[5]=b2
xc3[6]= k1 ; yc3[6]=A*k1+B;
xc3[1]= -xc3[6] ; yc3[1]=yc3[6]
xc3[2]= -xc3[5] ; yc3[2]= b2
-----

xc3[9]= xc3[4] ; yc3[9]= yc3[4]+eap
xc3[8]=xc3[9]+eair6 ; yc3[8]= yc3[9]
xc3[10]= xc3[3] ; yc3[10]= yc3[3]+eap
xc3[11]=- xc3[8] ; yc3[11]= yc3[8]
xc3[7]= k2 ; yc3[7]= A*k2+C;
xc3[12]=- xc3[7] ; yc3[12]= yc3[7]

for i=1,12 do
mi_addnode( xc3[i],yc3[i] )
end
for i=1,12 do
mi_selectnode( xc3[i],yc3[i] )
mi_setnodeprop("None",3)
end

mi_addsegment(xc3[1],yc3[1], xc3[2],yc3[2])
mi_addsegment(xc3[2],yc3[2], xc3[5],yc3[5])
mi_addsegment(xc3[5],yc3[5], xc3[6],yc3[6])
mi_addsegment(xc3[7],yc3[7], xc3[8],yc3[8])
mi_addsegment(xc3[8],yc3[8], xc3[11],yc3[11])
mi_addsegment(xc3[11],yc3[11], xc3[12],yc3[12])
mi_addsegment(xc3[3],yc3[3], xc3[10],yc3[10])
mi_addsegment(xc3[4],yc3[4], xc3[9],yc3[9])

for i=1,11 do
mi_selectsegment(0.5*(xc3[i]+xc3[i+1]),0.5*(yc3[i]+yc3[i+1]));
mi_setsegmentprop("none", 0, automesh, 0, 3)
end
mi_selectsegment(0.5*(xc3[3]+xc3[10]),0.5*(yc3[3]+yc3[10]));
mi_selectsegment(0.5*(xc3[4]+xc3[9]),0.5*(yc3[4]+yc3[9]));
mi_setsegmentprop("none", 0, automesh, 0, 3)
-- Attribution région air autour des aimants.

xair5=30 yair5=70
xair6=-30 yair6=70
xfer3=0 yfer3=75
Xair={}
Yair={}
Xair[1]=xair5 Yair[1]=yair5
Xair[2]=xair6 Yair[2]=yair6
for i=1,2 do
mi_addblocklabel( Xair[i], Yair[i])
mi_selectlabel(Xair[i],Yair[i])
mi_setblockprop("Air",0,1, 'None',0 , 3, 'None')
end
mi_clearselected()

```

```

Xfer={}
Yfer={}
Xfer[1]=xfer3   Yfer[1]=yfer3
mi_addblocklabel( Xfer[1], Yfer[1])
mi_selectlabel(Xfer[1],Yfer[1])
mi_setblockprop("Pure Iron",0,1.5, 'None',0 , 3, 'None')

mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 90, 3, 4)

--
*****
*****-----
-----arbre du rotor-----
-----
xri1=30;xri2=-30;
yri1=0;yri2=0;
Xri={}
Yri={}
Xri[1]=xri1      Yri[1]=yri1
Xri[2]=xri2      Yri[2]=yri2
for i=1,2 do
mi_addnode( Xri[i],Yri[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(Xri[i],Yri[i])
mi_setnodeprop("zero",2)
end
mi_addarc( Xri[1],Yri[1], Xri[2],Yri[2],180,2)
mi_selectarcsegment(Xri[1],Yri[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 2)
mi_addarc( Xri[2],Yri[2], Xri[1],Yri[1],180,2)
mi_selectarcsegment(Yri[1],Xri[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 2)
--Fin
mi_clearselected()
----- les encoches statoriques-----
-----
xri1=1.625;xri8=-1.625;xri2=xri1;xri7=xri8;xri3=4.62;xri6=-
xri3;xri4=8.4;xri5=-xri4
yri1=82.484;yri8=82.484;yri2=yri1+1.625;yri7=yri8+1.625;yri3=yri2+2.7;yri
6=yri3;yri4=110.8;yri5=yri4
Xri={}
Yri={}
Xri[1]=xri1      Yri[1]=yri1
Xri[2]=xri2      Yri[2]=yri2
Xri[3]=xri3      Yri[3]=yri3
Xri[4]=xri4      Yri[4]=yri4
Xri[5]=xri5      Yri[5]=yri5
Xri[6]=xri6      Yri[6]=yri6
Xri[7]=xri7      Yri[7]=yri7
Xri[8]=xri8      Yri[8]=yri8

```

```

for i=1,8 do
mi_addnode( Xri[i],Yri[i] )
end
for i=1,8 do
mi_selectnode(Xri[i],Yri[i])
mi_setnodeprop("None",1)
end
mi_addsegment(Xri[1],Yri[1], Xri[2],Yri[2])
mi_addsegment(Xri[2],Yri[2], Xri[3],Yri[3])
mi_addsegment(Xri[3],Yri[3], Xri[4],Yri[4])
mi_addsegment(Xri[4],Yri[4], Xri[5],Yri[5])
mi_addsegment(Xri[5],Yri[5], Xri[6],Yri[6])
mi_addsegment(Xri[6],Yri[6], Xri[7],Yri[7])
mi_addsegment(Xri[7],Yri[7], Xri[8],Yri[8])
for i=1,7 do
mi_selectsegment(0.5*(Xri[i]+Xri[i+1]),0.5*(Yri[i]+Yri[i+1]));
mi_setsegmentprop("none", 0, automesh, 0, 1)
end

mi_clearselected()
mi_selectgroup(1)
mi_copyrotate(0, 0, 15, 23, 1)

-- Rayon interne du stator
xcui1=82.5;xcui2=-82.5;
ycui1=0;ycui2=0;
Xcui={}
Ycui={}
Xcui[1]=xcui1      Ycui[1]=ycui1
Xcui[2]=xcui2      Ycui[2]=ycui2
for i=1,2 do
mi_addnode( Xcui[i],Ycui[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(Xcui[i],Ycui[i])
mi_setnodeprop("None",1)
end
mi_addarc( Xcui[1],Ycui[1], Xcui[2],Ycui[2],180,2)
--mi_selectarcsegment(Xcui[1],Ycui[1])
--mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 1)
mi_addarc( Xcui[2],Ycui[2], Xcui[1],Ycui[1],180,2)
--mi_selectarcsegment(Ycui[1],Xcui[2])
--mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 1)
--Fin Rayon interne du stator
--fin
-----Rayon externe du STATOR
Avec condition de dirichlet à la frontière
xreA1=135 ;xreA2=-135;
yre1=0;yreA2=0;
XreA={}
YreA={}
XreA[1]=xreA1      YreA[1]=yreA1
XreA[2]=xreA2      YreA[2]=yreA2

```

```

for i=1,2 do
mi_addnode( XreA[i],YreA[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(XreA[i],YreA[i])
mi_setnodeprop("zero",1)
end
mi_addarc( XreA[1],YreA[1], XreA[2],YreA[2],180,1)
mi_selectarcsegment(YreA[1],XreA[1])
mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 1)
mi_addarc( XreA[2],YreA[2], XreA[1],YreA[1],180,1)
mi_selectarcsegment(YreA[1],XreA[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 1)

-----Remplire les aimants du rotor
interne-----
xari1=0;
xari2=0;
yari1=50.375;
yari2=yari1+10;
xari3=0;
yari3=yari1+20;
Xari={}
Yari={}
Xari[1]=xari1      Yari[1]=yari1
Xari[2]=xari2      Yari[2]=yari2
Xari[3]=xari3      Yari[3]=yari3
mi_addblocklabel( Xari[1], Yari[1])
mi_selectlabel(Xari[1],Yari[1])
mi_setblockprop("AP",0,1.5, 'None', 90, 3, 'None')
mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 1, 2)
mi_addblocklabel( Yari[1],Xari[1] )
mi_selectlabel(Yari[1],Xari[1])
mi_setblockprop("AP",0,1.5, 'None', 180, 3, 'None')
mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 1, 2)

mi_addblocklabel( Xari[2], Yari[2])
mi_selectlabel(Xari[2],Yari[2])
mi_setblockprop("AP",0,1.5, 'None',90, 3, 'None')
mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 1, 2)
mi_addblocklabel( Yari[2],Xari[2] )
mi_selectlabel(Yari[2],Xari[2])
mi_setblockprop("AP",0,1.5, 'None', 180, 3, 'None')
mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 1, 2)

mi_addblocklabel( Xari[3], Yari[3])
mi_selectlabel(Xari[3],Yari[3])
mi_setblockprop("AP",0,1.5, 'None',90, 3, 'None')

```

```

mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 1, 2)
mi_addblocklabel( Yari[3],Xari[3] )
mi_selectlabel(Yari[3],Xari[3])
mi_setblockprop("AP",0,1.5, 'None', 180, 3, 'None')
mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 1, 2)
--
mi_clearselected()

----- Remplissage des encoches
-----

-----*****REPLISSAGE PHASE1
-----*****

-- q encoches aller phase 1
N=99
xenc1=0;
yenc1=95.2909;
xenc2=24.6631 ;
yenc2=92.044;
Xenc={}
Yenc={}
Xenc[1]=xenc1      Yenc[1]=yenc1
Xenc[2]=xenc2      Yenc[2]=yenc2
for i=1,2 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,1.5, "phase A", "none", 4, N)
end
mi_selectgroup(4)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

-- q encoches retour phase 1
xenc3=95;
yenc3=0;
xenc4=92.0739 ;
yenc4=-24.6711;
Xenc[3]=xenc3      Yenc[3]=yenc3
Xenc[4]=xenc4      Yenc[4]=yenc4
for i=3,4 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,1.5, "phase A", "none", 5, -N)
end
mi_selectgroup(5)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

mi_clearselected()
-----fin remplissage phase 1
-----*****REPLISSAGE PHASE2
-----*****

```

```

-----q encoches retour phase 2 -----
-----
xenc6=47.661 ;
yenc6=-82.5512;
xenc7=24.6711 ;
yenc7=-92.0739;

Xenc={}
Yenc={}
Xenc[6]=xenc6      Yenc[6]=yenc6
Xenc[7]=xenc7      Yenc[7]=yenc7

for i=6,7 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,1.5, "phase B", "none", 6, -N)
end
mi_selectgroup(6)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

----- q encoches aller phase 2
xenc8= 82.5512;
yenc8=47.661;
xenc9=92.0739 ;
yenc9=24.6711;
Xenc[8]=xenc8      Yenc[8]=yenc8
Xenc[9]=xenc9      Yenc[9]=yenc9
for i=8,9 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,1.5, "phase B", "none", 7, N)
end
mi_selectgroup(7)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

mi_clearselected()

----- fin remplissage de la phase 2

-----"*****REPLISSAGE PHASE 3
*****"
-----q encoches retour phase 3 -----
-----
xenc10=67.4028;
yenc10=67.4028 ;
xenc11=47.661 ;
yenc11=82.5512;

Xenc[10]=xenc10      Yenc[10]=yenc10
Xenc[11]=xenc11      Yenc[11]=yenc11

for i=10,11 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])

```

```

mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,1.5, "phase C", "none", 8, -N)
end
mi_selectgroup(8)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

----- q enconches aller phase 3
xenc12=82.5512;
yenc12=-47.661;
xenc13=67.4028 ;
yenc13=-67.4028;
Xenc[12]=xenc12      Yenc[12]=yenc12
Xenc[13]=xenc13      Yenc[13]=yenc13
for i=12,13 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,1.5, "phase C", "none", 9, N)
end
mi_selectgroup(9)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

mi_clearselected()

----- fin remplissage de la phase 3-----
-----Entrefer et fer du
rotor*****
-- entrefer
xe=0;
ye=82.125;
Xe={}
Ye={}
Xe[1]=xe      Ye[1]=ye
mi_addblocklabel( Xe[1], Ye[1])
mi_selectlabel(Xe[1],Ye[1])
mi_setblockprop("Air",0,0.25, 'None',0 , 0, 'None')
mi_clearselected()
-- fer du rotor
xsr=0;
ysr=45;
xss=0;
yss=130;
Xs={}
Ys={}
Xs[1]=xsr Ys[1]=ysr
Xs[2]=xss Ys[2]=yss
for i=1,2 do
mi_addblocklabel( Xs[i], Ys[i])
mi_selectlabel(Xs[i],Ys[i])
mi_setblockprop("Pure Iron",0,1.5, 'None',0 , 0, 'None')
end
--Fin Cercle entrefer

```

```

--fin de la géométrie--

mi_zoomnatural()
-----
-----FIN GEOMETRIE-----
-----
mi_saveas("MSAP_AE_3.fem")
-----
*****
-----
mi_close()
open("MSAP_AE_3.fem")
mi_saveas("temp.fem")
pi = 3.141592
freq = 50
step = 5 -- in degree
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(3)
mi_selectgroup(33)
mi_moverotate(0,0,-step)
for deg= 0, 360, step do
    time = deg*(pi/360)/(2*pi*freq)
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(3)
    mi_selectgroup(33)
    mi_moverotate(0,0,step)
    mi_analyze(1)
    mi_loadsolution()

    -- flux linkage of phase A
    x1,x2,x3,x4,flux_phase_A,x6 = mo_getcircuitproperties("phase A");
    -- flux linkage of phase B
    x1,x2,x3,x4,flux_phase_B,x6 = mo_getcircuitproperties("phase B");
    -- flux linkage of phase C
    x1,x2,x3,x4,flux_phase_C,x6 = mo_getcircuitproperties("phase C");
    handle = openfile("flux_link_A_3.txt","a")
    write(handle,deg," \t",flux_phase_A," ", "\n")
    closefile(handle)
    handle = openfile("flux_link_B_3.txt","a")
    write(handle,deg," \t",flux_phase_B," ", "\n")
    closefile(handle)
    handle = openfile("flux_link_C_3.txt","a")
    write(handle,deg," \t",flux_phase_C," ", "\n")
    closefile(handle)
-----
x4=82.125
y4=0
-- couple de détente par contour integral
    mo_selectpoint(x4,y4)
    mo_addcontour(-x4,-y4)
    mo_bendcontour(-180,0.5)
    mo_addcontour(x4,y4)
    mo_bendcontour(-180,0.5)
    torq_det = mo_lineintegral(4)

```

```
mo_clearcontour()
mo_clearcontour()
handle = openfile("couple_détente_3.txt","a")
write(handle,deg," \t",torq_det," ", "\n")
print(deg,torq_det)
closefile(handle)
mo_close()
end
mi_close()
```

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude d'une machine synchrone à aimants permanents enterrés (MSAPE) en utilisant la méthode des éléments finis. Nous avons entamé notre étude par exposer un aperçu global des machines synchrones, en nous concentrant particulièrement sur les MSAPE et les différents types d'aimants utilisés dans ces machines.

Nous avons exploré, par la suite, les équations fondamentales régissant le fonctionnement de notre machine. Cette base théorique nous a préparés à l'étude par éléments finis, réalisée à l'aide du logiciel FEMM. Notre machine étudiée comporte 24 encoches statoriques et 2 paires de pôles au rotor, avec cinq variantes distinctes, différenciées par le nombre de couches d'aimants et leurs dispositions.

Enfin, nous avons relevé les caractéristiques statiques de chaque configuration, notamment les flux magnétiques, l'induction magnétique et le couple de détente. Une comparaison détaillée entre ces variantes a été effectuée pour démontrer l'influence du nombre de couches d'aimants permanents et leurs dispositions dans le rotor sur les performances des machines.

Ce travail permet de mieux comprendre les impacts de la configuration des aimants sur les caractéristiques des MSAPE, fournissant ainsi des informations précieuses pour l'optimisation et la conception future de ces machines.

Abstract

This thesis focuses on the study of a buried permanent magnet synchronous machine (PMSM) using the finite element method. We began our study by providing a general overview of synchronous machines, with a particular emphasis on PMSMs and the various types of magnets used in these machines.

We then explored the fundamental equations governing the operation of our machine. This theoretical foundation prepared us for the finite element analysis conducted using the FEMM

Software. The machine studied features 24 stator slots and 2 pole pairs on the rotor, with five distinct variants differentiated by the number of magnet layers and their arrangements.

Finally, we analyzed the static characteristics of each configuration, including magnetic flux, magnetic induction, and cogging torque. A detailed comparison between these variants was carried out to demonstrate the influence of the number of permanent magnet layers and their arrangements on the performance of the machines.

This work enhances the understanding of how magnet configuration impacts the characteristics of PMSMs, providing valuable insights for the optimization and future design of these machines