

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère
de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. Mira – BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique

Mémoire

Présente en vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option

Machines Électriques

Thème

*Etude par éléments finis d'une FEM induite d'une M.S
à aimants permanents*

Présenté par :

BABOURI Kamila

BENAYAD Houria

KIFOUCHE Merzouk

Encadré par

Pr R Saou

Année universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions le grand Dieu qui nous a donné l'occasion de vivre cette journée et le remercions de nous avoir donné la force et la patience de faire ce travail.

Les remerciements sincères à notre encadreur le professeur R_Saou, qui a joué un rôle important dans l'achèvement de ce travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.

Enfin, un grand merci aux membres de la famille pour leur soutien tout au long du travail.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :
Mes chers parents qui ont fait de
moi ce que je suis par leurs
sacrifices, à mes frères, mes sœurs
et à toute ma famille, à tous mes
amis et à toutes les personnes qui
ont contribué de près ou de loin à
la Couronnement et à la réussite de
ce travail.*

Kami la

Dédicace

*A ma chère mère et mon cher père qui
ont fait de moi ce que je suis
par leurs sacrifices,
à mes frère et
mes chères sœurs
et bien sur sans oublier mais amis*

Houria

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes parents avec toute ma gratitude

pour toutes ces

années de sacrifices et

d'encouragement.

A mon frère,

A ma sœur,

A toute ma famille.

A tous mes amis

A tous ceux que j'aime

Merzouk

Table des matières

Introduction général	1
1 Chapitre 1 :Généralités sur les Machines synchrones à aimants permanents	3
1.1 Introduction	3
1.2 Constitution de la MS	3
1.3 Différents types de machines synchrones.....	4
1.4 La machine synchrone à aimants permanents	4
1.5 Généralités sur les aimants permanents utilisés dans les MSAP.....	5
1.5.1 Valeur magnétiques et physiques des aimants	6
1.5.2 Les différents types d'aimants permanents	6
1.6 Structures des inducteurs des MSAP	9
1.6.1 Structures à flux radial (RFPM).....	9
1.6.2 Structures à flux axial (AFPM)	11
1.7 Fonctionnement de la MSAP.....	12
1.7.1 Fonctionnement en mode génératrice (GSAP).....	12
1.7.2 Fonctionnement en mode Moteur (MSAP).....	13
1.8 Applications des machines synchrones à aimants permanents.....	13
1.9 Les avantages et inconvénients des MSAP	13
1.10 Conclusion.....	14
2 Chapitre 2 : modélisation par éléments finis de la machine étudiée.....	15
2.1 Introduction :	15
2.2 Lois générales de l'électromagnétisme :	15
2.3 Les équations de Maxwell dans le vide	16
2.3.1 Enoncé des équations	16
2.3.2 Charges, courants et champs [20]	17
2.3.3 Equations du milieu [21]	18
2.3.4 Contenu physique des équations de Maxwell [20].....	18

2.4	Propriétés et conséquences des équations de Maxwell	19
2.4.1	Existence d'ondes électromagnétiques [20]	20
2.5	Principe du calcul par éléments finis	21
2.5.1	Présentation du logiciel FEMM[12]	21
2.6	Conclusion	23
3	Chapitre 3 : Détermination et analyse des caractéristiques statiques de la MSAP	24
3.1	Introduction	24
3.2	Présentation de la machine étudiée :	24
3.3	Influence des paramètres géométriques de la machine sur les caractéristiques de la machine	25
3.3.1	Influence sur l'induction magnétique dans l'entrefer.	25
3.3.2	Influence sur le flux magnétique par phase	33
3.3.3	Couple électromagnétique	37
3.3.4	Couple de détente	37
3.3.5	Force électromotrice (FEM) par phase	38
3.4	Conclusion	42
	Conclusion générale	45

Table des figures

Figure 1-1:machine synchrone à aimant permanent	5
Figure 1-2:cycle d'hystérésis	5
Figure 2-1:Maillage d'une MSAP	22
Figure 3-1:Présentation de la machine étudiée.	24
Figure 3-2:induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=110^\circ$).....	26
Figure 3-3:induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=120^\circ$).....	27
Figure 3-4:induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=130^\circ$).....	27
Figure 3-5:induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=140^\circ$).....	28
Figure 3-6:induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=150^\circ$).....	28
Figure 3-7:induction magnétique le long de l'entrefer pour les ouvertures d'aimants ($\beta=120^\circ$ et $\beta=150^\circ$).....	29
Figure 3-8:induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 2.4 mm.....	30
Figure 3-9:induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 3 mm	30
Figure 3-10:induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 4.7 mm.....	31
Figure 3-11: induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 7 mm.....	31
Figure 3-12: induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 9.3 mm.....	32
Figure 3-13: induction magnétique le long de l'entrefer pour les épaisseurs de l'aimant de 3 mm et de 9.3 mm.....	32
Figure 3-14:induction magnétique maximale dans l'entrefer en fonction de l'épaisseur de l'aimant.....	33
Figure 3-15:variation de flux magnétique en fonction de la position du rotor pour les ouvertures d'aimants ($\beta=120^\circ$ et $\beta=150^\circ$).....	34
Figure 3-16:Flux maximum par phase en fonction de l'ouverture des aimants.....	35
Figure 3-17:variation de flux en fonction de l'angle électrique par rapport au épaisseurs des aimants	36
Figure 3-18:variation du flux en fonction des épaisseurs des aimants.....	36
Figure 3-19: Allure du couple électromagnétique.....	37

Figure 3-20: Couple de détente de la MSAP.....	38
Figure 3-21:FEM en fonction de la position du rotor pour une ouverture de l'aimant de 120°	39
Figure 3-22:FEM de la phase 1 fonction de la position pour des ouvertures d'aimants variables.	40
Figure 3-23:FEM de la phase 1 fonction de la position pour des épaisseurs d'aimants variables.	41
Figure 3-24:variation de la FEM en fonction des épaisseurs des aimants	41

Liste des tableaux

<i>Tableau 1-1: Exemples de propriétés magnétiques des aimants [14,15].</i>	8
Tableau 3-1:les paramètres géométriques de MSAP.....	24

Nomenclature

\vec{E}	Champ électrique (V/m)
\vec{B}	Induction magnétique (tesla)
Br	La rémanence (tesla)
\vec{H}	Champ magnétique (A/m)
Hc	Champ coercitif
T_{max}	Température ($^{\circ}C$)
T	Temps (s)
$\partial D/\partial t$	Densité de courant déplacement [$A.m^2$]
\vec{D}	Vecteur induction électrique [C/m^2]
P	Charges volumiques [$C.m^{-3}$]
μ	Perméabilité magnétique (h/m)
σ	Conductivité électrique (S/m)
ϵ	Permittivité électrique (F/m)
\vec{A}	Le potentiel vecteur magnétique
J_s	Densité superficielle du courant (A/m)
\vec{J}_0	Densité du courant des sources d'alimentation
\vec{J}_{pm}	Densité de courant surfacique équivalente de l'aimant en présence
L	Inductance propre
Ψ	Flux magnétique
M	Induction Mutuelle

Abréviation

MSAP Machine synchrone à aimants permanents

MS Machine synchrone

RFPM Machine synchrone a flux radial

AFPM Machine a flux axiale à aimants permanents

GSAP Génératrice synchrone à aimants permanents

MSAP Moteur synchrone à aimants permanents

FEMM Finite Element Magnetics Method

Introduction générale :

L'augmentation constante de la demande d'énergie à travers le monde et les problèmes écologiques et environnementaux imposés par la nature ont donné naissance à un nouveau type d'énergie dite énergie propre, c'est l'énergie électrique.

Un actionneur électromagnétique est un mécanisme permettant de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique. En effet le domaine de la conversion de l'énergie électrique est marqué par le développement de l'électronique et de la micro-électronique. Les composants de l'électronique de puissance ont subi une grande évolution et ont vu leurs performances (tenue en tension et en courant, fréquences d'utilisation, rapidité de commutation ...) augmenter fortement.

Les machines électriques se partagent en différentes classes dont on cite : les machines statiques et les machines tournantes. Dans cette dernière, on distingue deux familles essentielles de machines tournantes (machines à courant continu et machines à courant alternatif) et dans les machines à courant alternatif on trouve les machines asynchrones et les machines synchrones (à rotor bobiné, à reluctance variable, à double excitation et à aimant permanent).

La machine synchrone à aimants permanents a été inventée par Nicolas Tesla, cette machine est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inertie ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes (actionneurs de robotique, servomoteur, entraînement à vitesse variable...etc.).

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'étude d'une machine à aimants permanents insérés dans le rotor avec un stator classique encoché, avec des encoches rectangulaires. Les aimants sont de type Nd-Fe-B à aimantation radiale.

L'objectif de notre étude consiste à modéliser une structure de machine synchrone à aimants permanents avec des différentes ouvertures et épaisseurs de l'aimant. Pour déduire la FEM induite à partir du flux et aussi déduire l'évolution de plusieurs paramètres (couple détente, couple de phase et induction) on utilise le logiciel FEMM et un programme de lissage et dérivation sous MATLAB.

Ce mémoire s'articule en trois chapitres :

Le premier chapitre : à travers une étude bibliographique, est consacré à des généralités sur la machine synchrone et les différents types des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) classées selon la disposition des aimants permanents dans le rotor de la machine, et la fin de ce chapitre aborde le fonctionnement de cette machine ainsi que les domaines d'application.

Le deuxième chapitre : concerne la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Ce modèle basée sur les équations du champ électromagnétique a été présenté.

A la fin de ce chapitre, on a présenté la méthode des éléments finis et le logiciel utilisé pour la résolution des équations du champ électromagnétique appliqué à la MSAP.

Dans le troisième chapitre : on a commencé par présenter nos machines d'étude qui sont les MSAP à aimants insérés, ainsi que leurs caractéristiques géométriques. Puis on a effectué plusieurs simulations concernant les flux magnétiques engendrés dans les phases des machines étudiées ,le caractéristique de l'induction magnétique (B_n), le couple détente et le couple de phase avec logiciel FEMM en effectuant des modifications sur les paramètres géométriques de notre machine (épaisseur et angle d'ouverture des aimants permanents) . La force électromotrice (FEM) de la machine d'étude est ensuite déduite des caractéristiques du flux magnétique en utilisant un programme MATLAB. L'influence des dimensions des aimants - sur les performances de la machine a été étudiée.

A la fin de notre travail nous allons terminer notre mémoire par une conclusion générale

1 Chapitre 1 : Généralités sur les Machines synchrones à aimants permanents

1.1 Introduction

Le champ magnétique existe à l'état naturel, c'est le champ magnétique terrestre. Les aimants sont des éléments qui produisent un champ magnétique. Les courants électriques parcourant un conducteur électrique ou mieux encore une bobine produisent des champs magnétiques. Le fonctionnement des machines électriques est basé principalement sur l'existence de champ magnétique.

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelée machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants permanents, soit par un circuit d'excitation continu. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au stator, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Deux modes de fonctionnement sont à distinguer pour les machines synchrones. En mode génératrice, elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor. En mode moteur elle consomme un courant électrique pour faire tourner le rotor à une vitesse déterminée par la fréquence du courant. [1]

Ce premier chapitre est consacré aux généralités sur les machines synchrones (MS), leur constitution, leur fonctionnement, et de façon particulière la machine synchrone à aimants permanents MSAP.

1.2 Constitution de la MS

La MS possède deux parties principales : L'inducteur porté le plus souvent par le rotor
L'induit porté par le stator parcouru par des courants alternatifs

- **Induit (Stator) :** Le stator est formé d'un circuit magnétique feuilleté portant un enroulement triphasé réparti dans des encoches. Ce bobinage constitue l'induit de la machine car il est le siège de forces électromotrices induites par le champ tournant [2]

- **Inducteur (Rotor) :** Le rotor est la partie tournante. Parfois c'est un aimant permanent pour les petites machines, mais en général c'est un électroaimant sous forme d'un cylindre ferromagnétique massif recevant un bobinage qui, alimenté en courant continu (excitation), génère p paires de pôles sud et nord alternés. Il existe des rotors à pôles saillants avec un nombre de paires de pôles p élevé, ou à pôles lisses [3].

1.3 Différents types de machines synchrones

Le moteur synchrone est utilisé dans une large gamme de puissance allant de Watt au Méga Watt, dans les applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse constante et l'attraction. A ces nombreux domaines d'emplois, correspondent autant de technologies différentes, dans les plus répandues peuvent être scindées en trois grandes familles :

- Les moteurs synchrones à inducteur bobiné, à pôles saillant ou pôles lisses.
- Les machines synchrones à réluctance variable.
- Les moteurs synchrones à aimants permanents, avec ou sans pièces polaires.

Notre étude est basée plus particulièrement sur cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevés). La machine synchrone à aimants permanents est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.

1.4 Les machines synchrones à aimants permanents

Les machines à aimants permanents sont largement utilisées dans des applications à haute vitesse, la structure attractive de cette machine est caractérisée par une grande puissance massique, un bon facteur de puissance et un excellent rendement. Néanmoins, la construction du rotor avec des aimants permanents engendre des difficultés particulières au niveau mécanique : les forces centrifuges qui sont appliquées directement sur les aimants risquent d'arracher ces derniers. Sur le plan thermique où l'échauffement dû aux pertes hystérésis (provenant de la pulsation du flux et les harmoniques du courant) peuvent démagnétiser les aimants [4].

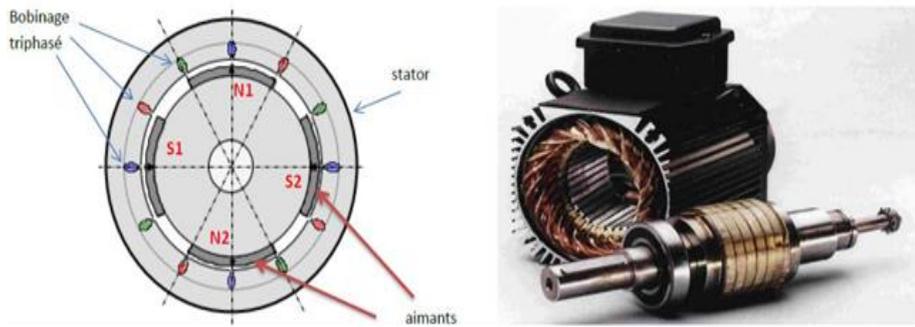


Figure 1-1:machine synchrone à aimants permanents

1.5 Généralités sur les aimants permanents utilisés dans les machines électriques

L'industrie des aimants permanents offre plusieurs catégories de matériaux qui se différencient par les procédés de leurs obtentions. Ces procédés ont un effet direct sur leurs caractéristiques magnétiques et mécaniques. Ces différences conduisent, selon l'application, à un choix d'un type d'aimant qui résulte le plus souvent de critères technico-économiques [6]. Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (figure I-2)

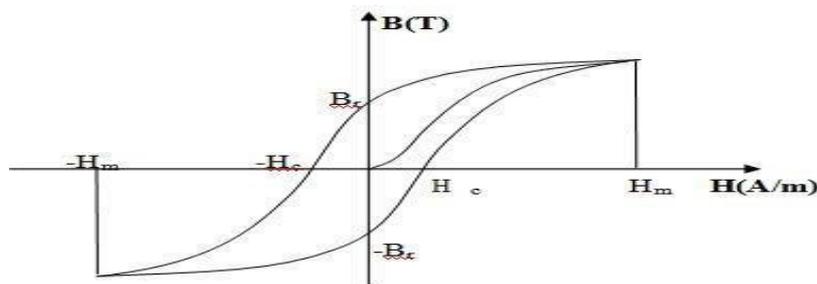


Figure 1-2:cycle d'hystérésis

1.5.1 Propriétés magnétiques et physiques des aimants

Les aimants sont caractérisés par des valeurs magnétiques et physiques comme suit :

- **Le produit d'énergie ($B \times H$) maximal** Représente la valeur de la qualité d'un aimant. Plus le produit d'énergie est élevé, plus il y a d'énergie dans le matériau magnétique. Le produit d'énergie ressort des plus grandes valeurs de B et de H indiquées sur la courbe de démagnétisation.
- **La rémanence B_r** est indiquée en Tesla (T) ou en milli tesla (mT), et en Gauss (G) dans le système CGS. La rémanence est la magnétisation résiduelle ou la densité de flux qui subsiste dans un aimant qui a été magnétisé en circuit fermé jusqu'à saturation. (plus B_r est important, plus l'aimant est performant).
- **La force du champ coercitif H** est la force du champ contraire nécessaire en kA/m (ou Oersted Oe) que l'on doit utiliser pour démagnétiser un aimant. Plus la valeur est élevée, plus la résistance à la démagnétisation est importante.
- **La perméabilité** est la capacité de conduction magnétique. Pour presque tous les matériaux magnétiques, la perméabilité est à peine supérieure à celle de l'air, alors qu'elle est plus de mille fois supérieure pour le fer.
- **Le coefficient de température** indique la diminution réversible de la rémanence en % pour 1°C d'accroissement de température à partir de la température ambiante de 20°C .
- **La température maximale d'utilisation** n'est qu'une valeur approximative étant donné qu'elle est fonction du dimensionnement des aimants (rapport L/D). La valeur indiquée n'est obtenue que si le produit de B et H est au maximum (voir "Dimensionnement de l'aimant").
- **La densité ou la masse spécifique** sont indiquées en g/cm^3 . Si le point de Curie est atteint, tout matériau magnétique perd son magnétisme.
Le tableau d'aide (1.1) au choix indique les caractéristiques moyennes des différents matériaux magnétiques proposés dans les pages suivantes [16].

1.5.2 Les différents types d'aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types:

- **Les Alnico:** aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt-fer. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de par leur composition métallique ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de

l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.

- **Les Ferrites:** aimants permanents, formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie – prix

L'utilisation des ferrites dans les machines électriques conduit généralement à des couples faibles. Les ferrites sont généralement utilisées là où le critère de la puissance volumique n'est pas prépondérant [5].

- **Les alliages métaux – terres rares:** Les terres rares sont les meilleurs matériaux pour aimants performants [5]. Ils paraissent très bien appropriés pour les machines électriques. Leur coût encore élevé, a tendance à freiner l'extension de leur utilisation. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les Palsto-Neodyme. C'est un mélange de Neodyme-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 [17].

Le choix de l'aimant est effectué en fonction de caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable.

Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau 1.1 ci-dessous.

Tableau 1-1: Exemples de propriétés magnétiques des aimants [14,15].

Type D'aimants	Densité d'énergie (BH)max (kJ/ m ³)	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ Coercitif -Hc(kA/m)	Température Tmax (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co5	140-200	1	2000	280	220
Sm2 Co17	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites Strontium	27-35	0.3-04	250	250	6
Ferrites Barium	8-30	0.2-04	170	100-240	4.5

1.6 Structures des inducteurs des MSAP

Les MSAP peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est la suivante :

1.6.1 Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est identique à celui d'une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur, Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface (Figure I-3), soit insérés (Figure I-4) ou enterrés (Figure I-5). [12].

1.6.1.1 Structures à aimants déposés en surface

Elles sont appelées machines à inducteur lisse en raison de leurs aimants disposés au niveau de l'entrefer sur un noyau ferromagnétique lisse (Figure I-3). L'induction B_e dans l'entrefer est celle des aimants. Leur aimantation peut être radiale, tangentielle ou combinée. La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de réalisation. Cependant elle présente quelques inconvénients. En effet, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor [14 ,12]. La topologie à rotor externe est moins utilisée car plus difficile à réaliser et nécessite plus de volume d'aimant, présente les avantages suivants :

- Un diamètre du rotor, plus grand que pour les machines conventionnelles à flux radial, permettant d'avoir un nombre plus élevé de pôles et un couple plus grand.
- Une meilleure qualité de collage des aimants sur le rotor grâce à la force centrifuge qui pousse les aimants vers l'extérieur, rendant leur détachement presque impossible.

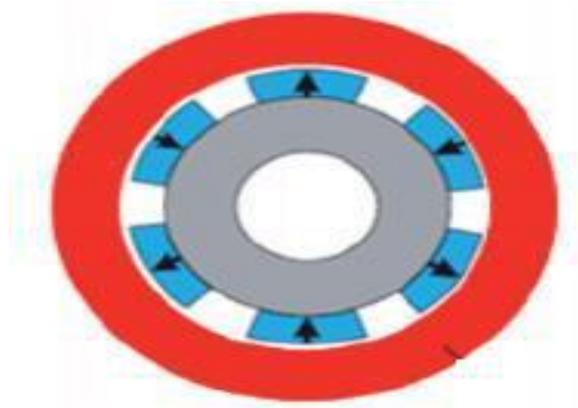


Figure 1-3 : structure à aimant déposé en surface

1.6.1.2 Structures à aimant insérés

Les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (I-4). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance qui donne un couple de réluctance en plus du couple des aimants

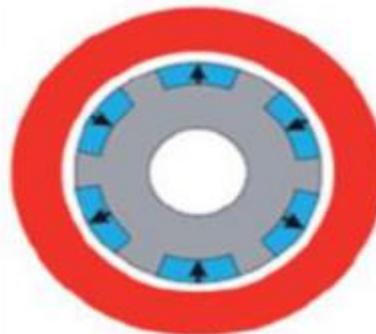


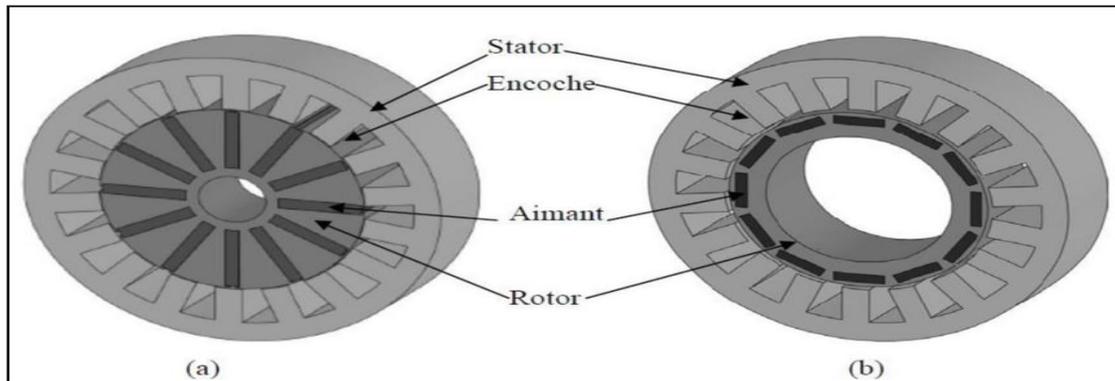
Figure 1-4 : Structure à aimants encastrés ou insérés

1.6.1.3 Structures à aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor. La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées (voir Figure I-5), l'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique.

Ces structures offrent un certain nombre d'avantages parmi lesquels :

- Des rotors robustes qui permettent de plus grandes vitesses de rotation.
- Une adaptation à des puissances plus importantes.
- De bonnes performances, selon la littérature, surtout avec les aimants du type NdFeB[5].



1.6.2 Structures à flux axial (AFPM)

Les machines à flux axial ont fait l'objet d'importants efforts de recherche dans le monde entier, après les années 80.

La machine à flux axial à aimants permanents, est une machine de forme discoïdale qui constitue une alternative intéressante à la machine cylindrique à flux radial grâce à sa forme, sa construction compacte et à sa densité de couple élevée, l'étude des machines à flux axial est mue par leur encombrement réduit et leur densité de couple élevée [19].

. Différentes configurations à flux axial existent : celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure I.6) et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors (Figure I.7) ou un seul rotor inséré entre deux stators (Figure I.8). L'exploitation de ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [14,15].

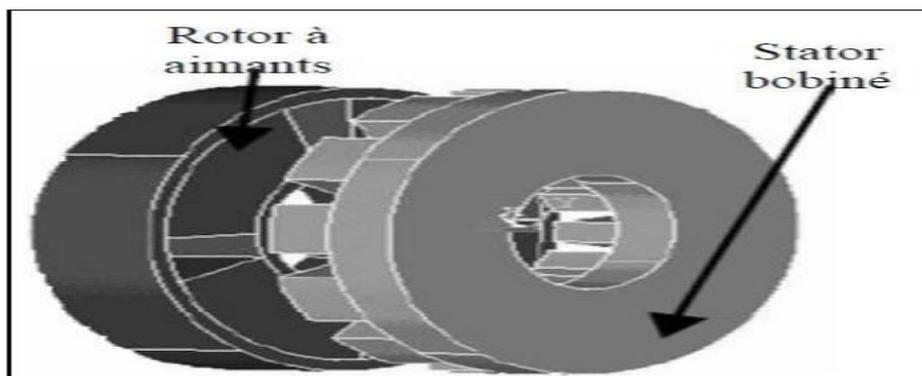


Figure 1-6 : Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.

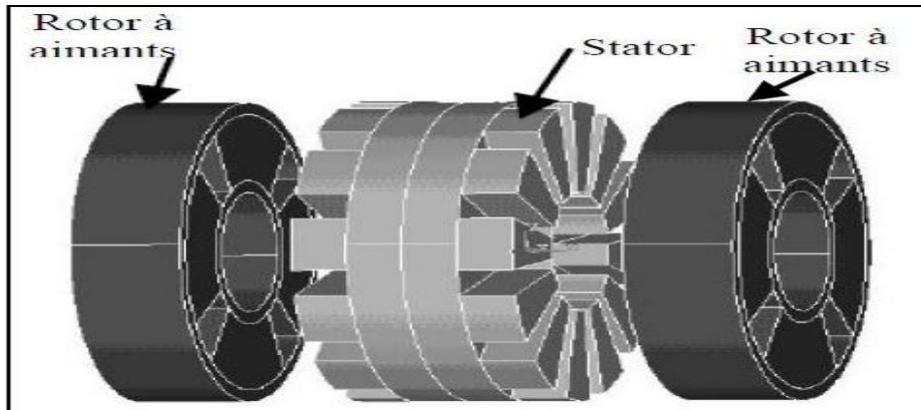


Figure 1-7 : Structure à flux axial avec double rotor et un stator

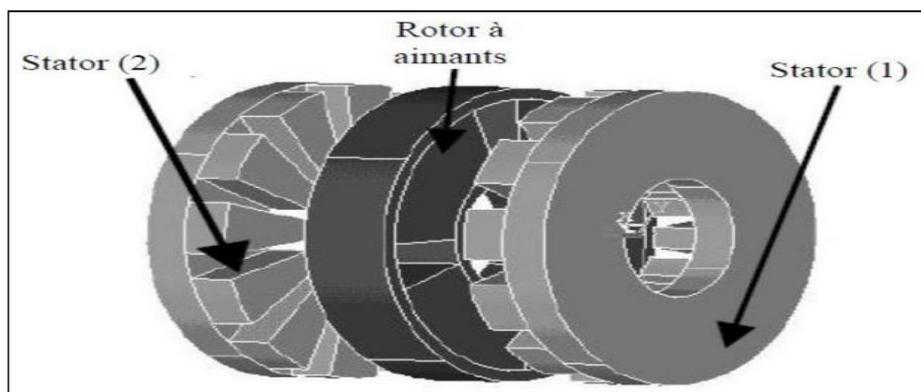


Figure 1-8 : Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.

1.7 Fonctionnement de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est une machine réversible donc elle peut fonctionner en deux modes (mode génératrice et mode moteur) :

1.7.1 Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW [18]. L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatial

variable dans les bobinages statoriques. Les forces-électro-motrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur.

1.7.2 Fonctionnement en mode Moteur (MSAP)

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

1.8 Applications des machines synchrones à aimants permanents

Ces machines ont trouvé un vaste champ d'applications dans plusieurs domaines (équipement domestique, lecteurs CD/DVD et disques durs d'ordinateur, voiture et vélo électriques, transport, aérospatial, machines-outils, servomoteurs, équipement médical et propulsion des navires). Celles-ci sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts.

1.9 Les avantages et inconvénients des MSAP

La machine synchrone à aimants permanents en surface semble être le meilleur choix pour le moteur-roue. Ces machines ont effectivement des avantages non négligeables :

- Rapports couple/masse et puissance/masse élevés.
- Très bon rendement.
- Moindre usure et moins de frais d'entretien (pas de balais, ni charbons).

Cependant ils ont tout de même certains inconvénients :

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants (250 °C pour le samarium-cobalt)
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Difficulté de défluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position).
- Impossibilité de régler l'excitation.

- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule.
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur la machine synchrone à aimants permanents en se basant sur les caractéristiques et les différents types d'aimants permanents qui constituent un élément fondamental pour ce type de machine. Nous avons présenté aussi les différentes structures de MSAP en fonction de la position des aimants sur le rotor, les différents modes de fonctionnement des MSAP ainsi que leur domaine d'application et enfin les avantages et les inconvénients de ses machines.

2 Chapitre 2 : modélisation par éléments finis de la machine étudiée

2.1 Introduction :

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

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques.

Dans ce chapitre nous exposerons les différents équations et bases théoriques utilisées dans le prochain chapitre. Nous exposerons en premier lieu la modélisation électromagnétique à partir des équations de Maxwell. Nous présenterons à la fin de ce chapitre la méthode de résolutions des équations aux dérivées partielles et une présentation générale de machine étudiée dans le cadre de ce travail ainsi que le logiciel utilisé.

2.2 Lois générales de l'électromagnétisme :

La maîtrise complète des phénomènes électromagnétiques repose fondamentalement sur les équations de Maxwell. La description des phénomènes électromagnétiques est relativement facile en comparaison avec divers autres domaines des sciences physiques et de la technologie, puisque toutes les équations du champ peuvent être écrites comme un groupe unique d'équations.

Les quantités de bases impliquées dans les phénomènes sont les six grandeurs (5 sont vectorielles et une seule quantité scalaire) suivantes :

- Champ électrique \vec{E} [V/m]
- Champ magnétique \vec{H} [A/m]
- Induction électrique \vec{D} [C/m²]
- Induction magnétique \vec{B} [Vs/m²], [T]
- Densité volumique de courant \vec{j} [A/m²]
- Densité de charge électrique, dQ/dV ρ [C/m³]

2.3 Les équations de Maxwell

2.3.1 Enoncé des équations

Le socle de l'électromagnétisme repose sur cinq équations : les quatre équations de Maxwell et l'expression de la force de Lorentz. Ces équations sont (sous leur forme locale)

➤ L'équation de Maxwell Gauss $div \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$ (2.1)

➤ L'équation de Maxwell flux magnétique $div \vec{B} = 0$ (2.2)

➤ L'équation de Maxwell Faraday $rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (2.3)

➤ L'équation de Maxwell Ampère $rot \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ (2.4)

➤ La force de Lorentz $\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} * \vec{B})$ (2.5)

Ces équations portent le nom d'équations de Maxwell dans le vide. Cette dénomination est trompeuse car ces équations sont valables tout le temps. Elles s'appliquent en présence de charges et de courants c'est à dire dans un vide qui contient de la matière.

Ces équations sont souvent formulées, dans le cas de l'étude des machines électriques, en potentiel vecteur A.

Dans ce cas, la condition de jauge de coulomb est rajoutée.

$$div A = 0 \quad (2.6)$$

A est le potentiel vecteur (T m)

Remarque

➤ -L'équation de maxwell faraday $rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ découle de $E = -grad V - \frac{\partial A}{\partial t}$ en prenant son rotationnel

➤ L'équation de maxwell flux $div \vec{B} = 0$ découle de $B = rot A$ en prenant sa divergence

➤ la divergence de l'équation de maxwell ampère $rot \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ combinée avec

L'équation de maxwell gauss $div \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ donne l'équation de conservation de la charge

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div \vec{j} = 0$$

V est le potentiel scalaire (V)

$\frac{\partial A}{\partial t}$ est le champ électromoteur

2.3.2 Charges, courants et champs [20]

- **Charge électrique**

Au niveau microscopique, les charges sont ponctuelles. Leur valeur est toujours un multiple entier de la charge élémentaire $e \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$. Tout système physique est une collection de charges individuelles ponctuelles (même en mécanique quantique). Toute fois pour un système macroscopique, le nombre est tellement grand que l'on utilisera une description continue en terme de densité volumique de charge ρ .

Il est important de pouvoir passer de la description en terme de charges discrètes à une représentation continue. Pour faire le lien entre les expressions concernant des distributions continues de charge et les distribution discrètes, on étudie ce qui se passe dans un volume V .

$$Q = \iiint_V \rho(\vec{r}) d^3\vec{r} = \sum_{i \in V} q_i \quad (2.7)$$

On en déduit l'expression de la densité moyenne en considérant un volume V assez petit pour que les charges y soient réparties de manière homogène

$$\rho = \frac{1}{V} \sum_{i \in V} q_i \quad (2.8)$$

- **Courant électrique**

Le courant I qui traverse une surface S est le flux du vecteur densité de courant \vec{j} :

$$I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (2.9)$$

Une densité volumique de charge ρ animée d'une vitesse \vec{v} produit une densité de courant \vec{j} égale

$$\vec{j} = \rho \vec{v} \quad (2.10)$$

La densité de courant d'une distribution de charges ponctuelles q_i animées chacune d'une vitesse

Conservation de la charge électrique

$$\vec{j} = \frac{1}{V} \sum_{i \in V} q_i \vec{v}_i \quad (2.11)$$

La charge électrique est une quantité qui se conserve. La variation temporelle de la charge située dans un volume V délimité par une surface fermée S est le courant électrique qui traverse cette surface

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho d^3\vec{r} = - \oiint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (2.12)$$

La relation locale exprimant la conservation de la charge est :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0 \quad (2.13)$$

2.3.3 Equations du milieu [21]

La permittivité, la perméabilité et la conductivité électrique ϵ (F/m), μ (H/m) et σ ($\Omega^{-1}m$)⁻¹ du milieu détermine la dépendance de l'induction électrique et magnétique et la densité de courant à l'égard du champ magnétique.

Dans certain cas ϵ , μ et σ peuvent être considérés comme de simples constantes, on dit alors qu'on est en présence de milieux isotropes, ce qui signifie que ϵ , μ et σ ont les mêmes valeurs dans les différentes directions.

Si tel n'est pas le cas c'est-à-dire que ϵ , μ et σ n'ont pas les mêmes valeurs dans les différentes directions, elles sont alors traitées comme des tenseurs et ces milieux sont définis comme anisotrope.

Les équations de Maxwell ci-dessus doivent donc être complétées par les relations constitutives qui décrivent les propriétés macroscopiques des milieux considérés :

$$\bullet \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (a) \quad (2.14)$$

$$\bullet \quad \vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (b) \quad (2.14)$$

$$\bullet \quad \vec{j} = \sigma \vec{E} + \vec{j}_0 + \vec{j}_{PM} \quad (c) \quad (2.14)$$

Avec $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} = 8,855 \cdot 10^{-12} \quad \text{F/m, (As/Vm)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}, (\text{Vs/Am})$$

$$C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{Vitesse de la lumière})$$

Où σ représente la conductivité électrique du milieu considéré et μ sa perméabilité magnétique (en général une fonction de \vec{H}) et ϵ sa permittivité.

2.3.4 Contenu physique des équations de Maxwell [20]

Chacune de ces équations prises individuellement décrit un effet physique. La forme intégrale des équations de Maxwell permet de reconnaître facilement cet effet.

Equation de Maxwell Gauss

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.15)$$

Sous forme intégrale on reconnaît le théorème de Gauss :

$$\oiint_{\Sigma} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.16)$$

$$Q = \iiint_v \rho \, dr \quad (2.17)$$

Cette équation, est la même qu'en électrostatique. Elle exprime la manière dont les charges électriques sont à l'origine du champ électrique.

Maxwell flux magnétique

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.18)$$

Par analogie avec l'équation précédente on déduit que cette équation exprime qu'il n'existe pas de charge magnétique :

$$\oiint_{\Sigma} \vec{B} \, d\vec{S} = 0 \quad (2.19)$$

Maxwell Ampère

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.20)$$

Sous forme intégrale il s'agit du théorème d'Ampère

$$\oint_c \vec{B} \, d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \iint_{\Sigma} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.21)$$

Lorsque le champ électrique est stationnaire, il n'y a que le terme $\mu_0 I$ et on reconnaît le théorème d'Ampère de la magnétostatique. Dans le cas général, le second terme est appelé courant de déplacement.

Cette équation exprime la manière dont un courant électrique est à l'origine d'un champ magnétique. On remarquera qu'un champ électrique dépendant du temps crée lui aussi un champ magnétique.

Maxwell Faraday

$$\overrightarrow{\operatorname{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.22)$$

Cette équation décrit le phénomène d'induction : un champ magnétique variable est à l'origine d'un champ électrique. Ce champ est dénommé champ électromoteur :

$$\oint_c \vec{E} \, d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.23)$$

$$\phi = \iint_{\Sigma} \vec{B} \, d\vec{S} \quad (2.24)$$

2.4 Propriétés et conséquences des équations de Maxwell

Le théorème de superposition

Les équations de Maxwell sont des équations linéaires en \vec{E} , \vec{B} , ρ et \vec{j} .

Cohérence des équations

Si jusqu' à présent, les équations de Maxwell ont été séparément, chacune a permis de rendre compte d'un effet physique : la création d'un champ électrique par les charges électriques, l'absence de charge magnétique, la création d'un champ magnétique par un courant électrique et le phénomène d'induction. Le génie de Maxwell a été de comprendre qu'il s'agit d'un tout et que ces équations doivent être considérées comme un ensemble.

Prises ensembles plutôt qu'individuellement, ces équations contiennent beaucoup plus que ces phénomènes.

L'exemple le plus simple s'obtient en combinant Maxwell Ampère et Maxwell Gauss :

on écrit Maxwell Ampère

$$\overrightarrow{rot}\vec{B} = \mu_0\vec{j} + \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.25)$$

on prend la divergence

$$div(\overrightarrow{rot}\vec{B}) = \mu_0 div\vec{j} + \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial div\vec{E}}{\partial t} \quad (2.26)$$

le premier terme est nul car la divergence d'un rotationnel est nulle. Le troisième terme peut se réécrire grâce à Maxwell Gauss. Au final :

$$div\vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.27)$$

On obtient l'équation qui rend compte de la conservation de la charge. Ainsi, cette propriété n'est pas à ajouter, elle est déjà contenue dans les équations de Maxwell.

2.4.1 Existence d'ondes électromagnétiques [20]

En électrostatique, le champ électrique est dû à la présence de charges électriques : sans charge électrique, pas de champ électrique. En magnétostatique le champ magnétique est dû à la présence de courants électriques : sans courant électrique, pas de champ magnétique.

Lorsque l'on étudie des situations dynamiques où les différentes grandeurs dépendent du temps, on peut écrire Maxwell Faraday

$$\overrightarrow{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.28)$$

Si le champ magnétique dépend du temps on peut avoir un champ électrique avec une densité de charge électrique ρ nulle. Il suffit qu'il y ait un courant électrique : \vec{j} dépend de $t \rightarrow \vec{B}$ dépend de $t \rightarrow \vec{E}$ dépend de t .

On peut encore avoir plus et imaginer l'existence d'un champ électrique et d'un champ magnétique en l'absence de charge et de courant. Maxwell Faraday dit que \vec{B} qui dépend du

temps crée \vec{E} (qui dépend donc aussi du temps) Et Maxwell Ampère dit que \vec{E} qui dépend du temps crée \vec{B} . Le champ électromagnétique acquiert une existence autonome par rapport aux charges. Il est bien sur nécessaire d'avoir initialement des charges et des courants pour créer une onde électromagnétique, mais dès que celle-ci est émise, son existence ne dépend plus de ces charges et courants.

2.5 Principe du calcul par éléments finis

Elle est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP), dans tous les domaines des sciences de l'ingénieur Celle-ci est très puissante pour la résolution des EDP de MAXWELL Surtout dans les domaines complexes.

Le principe est de décomposer le domaine d'étude en un nombre fini d'éléments polygonaux qui forment le maillage. La valeur du potentiel vecteur est déterminée sur tous les sommets des polygones (les sommets sont appelés les nœuds de maillage). En employant des fonctions d'interpolation appropriées, la solution en tout point de domaine sera déterminée en fonction des valeurs aux sommets de l'élément. Elle ne s'applique pas directement sur les équations aux dérivées partielles mais sur une forme intégrale de celles-ci, cette formulation intégrale peut être variationnelle ou a résidus pondérés.

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis repose sur trois étapes essentielles :

- Formulation des équations aux dérivées partielles à partir des lois physiques.
- Transformation des équations en un système algébrique qu'il convient de résoudre pour obtenir la solution du problème posé
- Exécution des problèmes sur ordinateur à partir du logiciel approprié

2.5.1 Présentation du logiciel FEMM [12]

Le logiciel FEMM est une suite de programmes destinés à résoudre les problèmes électromagnétiques à basse fréquence sur les domaines planaires et axisymétriques à deux dimensions. Ce logiciel développé par David Meeker est divisé en trois parties :

❖ **Le Pré-processeur** : Ce module est utilisé pour définir la géométrie de la machine, définir les matériaux le constituant, les sources du champ magnétique, ainsi que les conditions aux limites.

- ✓ Dessiner la géométrie de la machine avec des arcs ou des segments de droite
- ✓ Définition du problème à savoir la nature du problème à résoudre (la fréquence, l'unité des grandeurs géométriques, la précision de calcul). Nous pouvons également définir la finesse du maillage.

- ✓ Introduction des caractéristiques des différentes régions géométriques de la structure (propriétés magnétiques des matériaux).
- ✓ Définition des circuits de la structure. Cette partie nous donne aussi la possibilité d'introduire le nombre de spires dans les bobinages ainsi que la valeur des courants.
- ✓ Introduction des courbes de saturations dans le cas où elle est prise en compte.
- ✓ Définition des conditions aux limites.

Dans ce type de conditions (condition de Dirichlet), la valeur de potentiel magnétique A est explicitement défini sur la limite. L'utilisation la plus commune des conditions de Dirichlet dans le cas problème magnétique est de définir $A=0$ le long d'une frontière (le flux magnétique ne traverse pas cette frontière).

❖ **Le maillage:**

Les différentes procédures suivies pour discrétiser la géométrie de la machine sont :

- Création d'un système de discrétisation.
- Discrétisation des segments et arcs
- maillage des différentes faces (on spécifie la forme des éléments).
- Les différentes surfaces ainsi délimitées, sont ensuite découpées en éléments finis et constituent le maillage du problème en des segments et arcs.

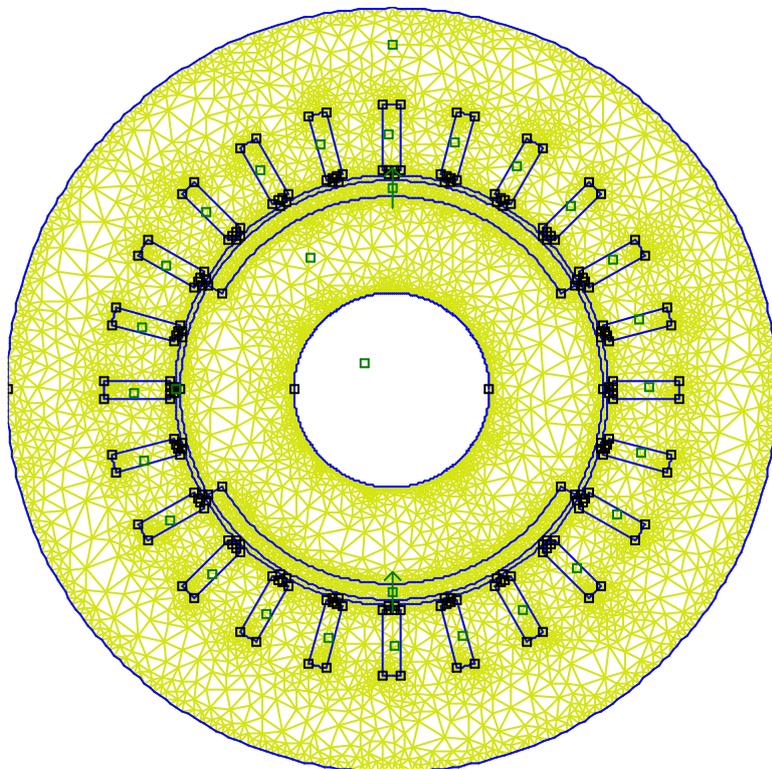


Figure 2-1:Maillage d'une MSAP

- **Le processeur** Ce programme permet la résolution du problème défini sur chaque élément de maillage en effectuant des itérations jusqu'à atteindre la précision imposée au pré-processeur. En chaque élément, le potentiel vecteur est connu et à partir de là, les autres grandeurs sont déduites.
- **Le post-processeur** Une fois les résultats sont déterminés par le processeur, le post-processeur nous permet de les visualiser et estimer les valeurs des grandeurs désirées soit en grandeurs locales (potentiel vecteur, induction, densité de courant...etc) ou en grandeurs globales par calculs intégraux (comme le flux, le couple...etc).

Dans le but de pouvoir modifier à notre guise les paramètres de la machine, pour voir leur influence sur leurs performances, l'écriture de programmes informatiques est nécessaire pour mener à bien des calculs répétitifs souvent lourds en termes de temps (un des inconvénients de la MEF).

2.6 Conclusion

Ce deuxième chapitre a fait l'objet d'une présentation des principales étapes de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis. Dans le chapitre suivant, l'application de cette méthode particulièrement pour la machine à aimants permanents insérés sera présentée.

3 Chapitre 3 : Détermination et analyse des caractéristiques statiques de la MSAP

3.1 Introduction

Le fonctionnement des machines électriques est directement lié à la distribution des lignes de champs magnétiques au sein de leur structure. Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel FEMM, pour déterminer les caractéristiques électromagnétiques de la MSAP (induction magnétique, couple de détente, couple électromagnétique et le flux magnétique par phase) et pour la détermination de l'évolution des FEM engendrées on a utilisé un programme de calcul sous MATLAB, basé sur l'interpolation et le lissage des courbes de flux. L'influence de l'ouverture et de l'épaisseur des aimants permanents sur les caractéristiques de la machine a été aussi étudiée.

3.2 Présentation de la machine étudiée :

La machine étudiée (Figure. 3.1 et Tab 3.1) est une machine synchrone triphasée à aimants permanents bipolaire avec des aimants permanents de type Néodyme fer bore (Nd-F-b) insérés dans la surface extérieure du rotor.

Son stator est cylindrique en tôles ferromagnétiques caractérisé par $z= 24$ encoches de forme rectangulaires, comportant un enroulement triphasé à simple couche.

Le rotor est lisse, en matériau ferromagnétique sur lequel sont collés deux aimants permanents, présentant une aimantation radiale.

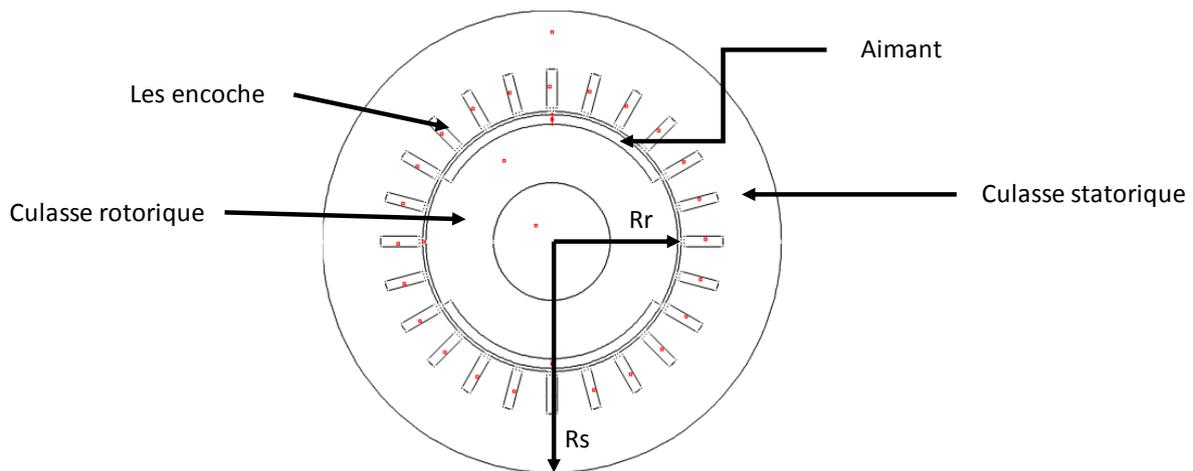


Figure 3-1:Présentation de la machine étudiée.

Tableau 3-1:les paramètres géométriques de MSAP

Symbole	Valeur	Désignation
Rsint(mm)	39.385	Rayon intérieur du stator
Rsext(mm)	71.75	Rayon extérieur de stator
Rr(mm)	35.385	Rayon de rotor
N	50	nombre de spire par bobine
U(volt)	220	tension d'alimentation
F (Hz)	50	Fréquence
Z	24	nombre d'encoche

3.3 Influence des paramètres géométriques de la machine sur les caractéristiques de la machine.

Dans ce qui suit, nous allons utiliser le logiciel FEMM pour relever les caractéristiques magnétiques et électriques de la machine et étudier l'influence de la variation de l'angle d'ouverture des aimants permanents ainsi que de leur épaisseur sur la forme et les amplitudes des caractéristiques statiques de la machine.

Nous avons d'abord fixé l'épaisseur des aimants à $h = 3$ mm et fait varier les ouvertures des aimants et retenu les angles suivants : 110° , 120° , 130° , 140° , 150° .

Nous avons ensuite fixé un angle d'ouverture de 120° et déterminé les caractéristiques de la machine pour les épaisseurs des aimants suivants : $h = 2.4, 3, 4.7, 7, 9.3$ mm

3.3.1 Influence sur l'induction magnétique dans l'entrefer.

a) Influence de l'ouverture de l'aimant.

Les figures 3.2 à 3.6 représentent la variation de l'induction magnétique relevée le long d'un contour situé au milieu de l'entrefer de la MSAP pour une épaisseur des aimants fixe ($h = 3$ mm) et pour des ouvertures des aimants variant de 110° à 150° .

Ces figures montrent d'un côté que les ouvertures des aimants n'ont aucune influence sur l'amplitude de l'induction normale le long de l'entrefer, par contre la forme d'onde de l'induction est très impactée.

L'onde de l'induction magnétique est composée de deux alternances l'une négative (face à l'aimant de pôle sud) et l'autre positive (face à l'aimant pôle nord) ... Entre les deux, l'induction

est nulle. C'est cette distance entre les deux alternances qui diminue au fur et à mesure de l'augmentation de l'ouverture de l'aimant, comme le montre aussi la figure 3.7, faisant que l'allure de l'induction magnétique se rapproche de plus en plus de la sinusoïde.

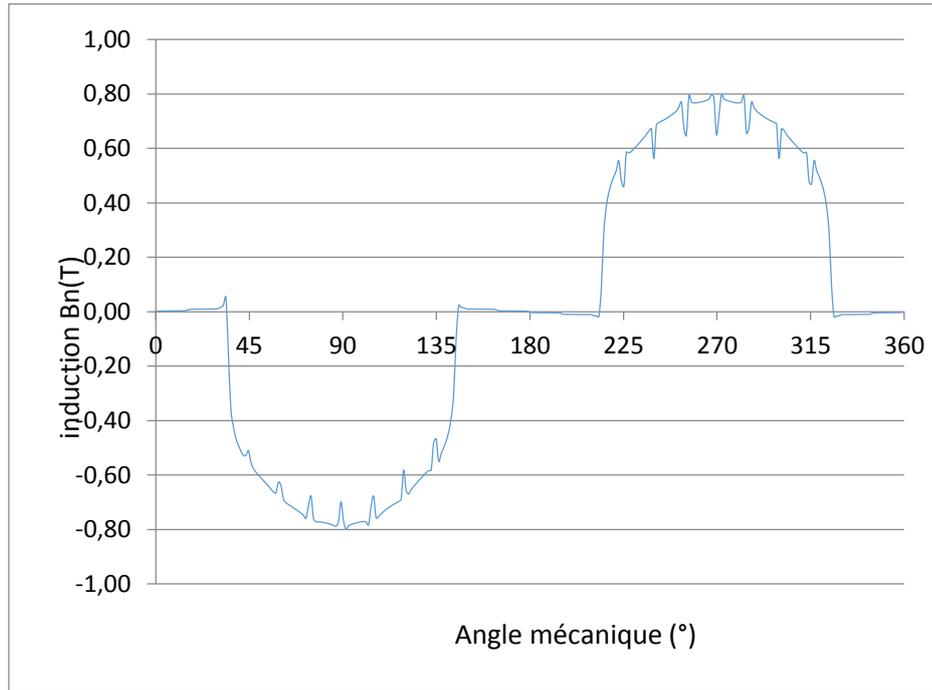


Figure 3-2: induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=110^\circ$)

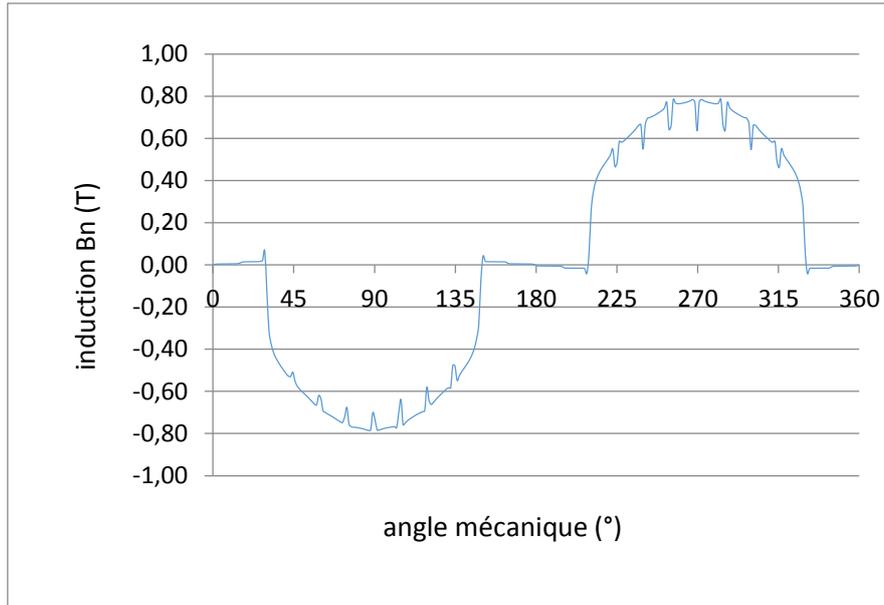


Figure 3-3: induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=120^\circ$)

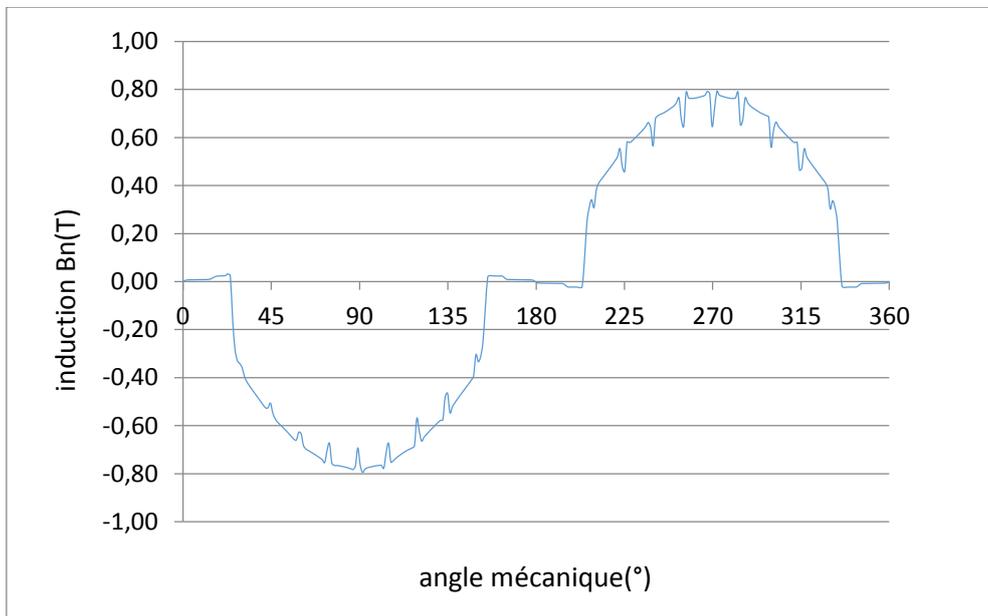


Figure 3-4: induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=130^\circ$)

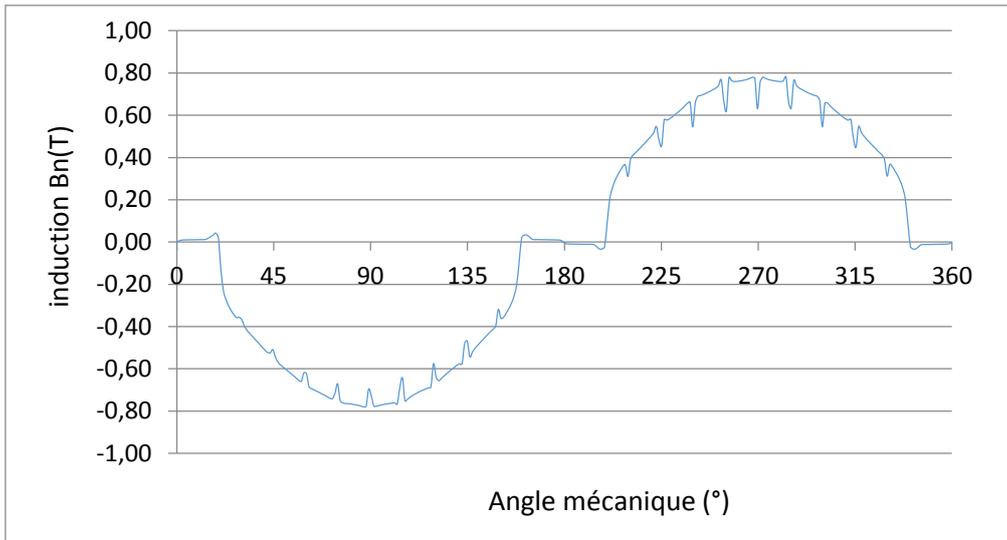


Figure 3-5: induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=140^\circ$)

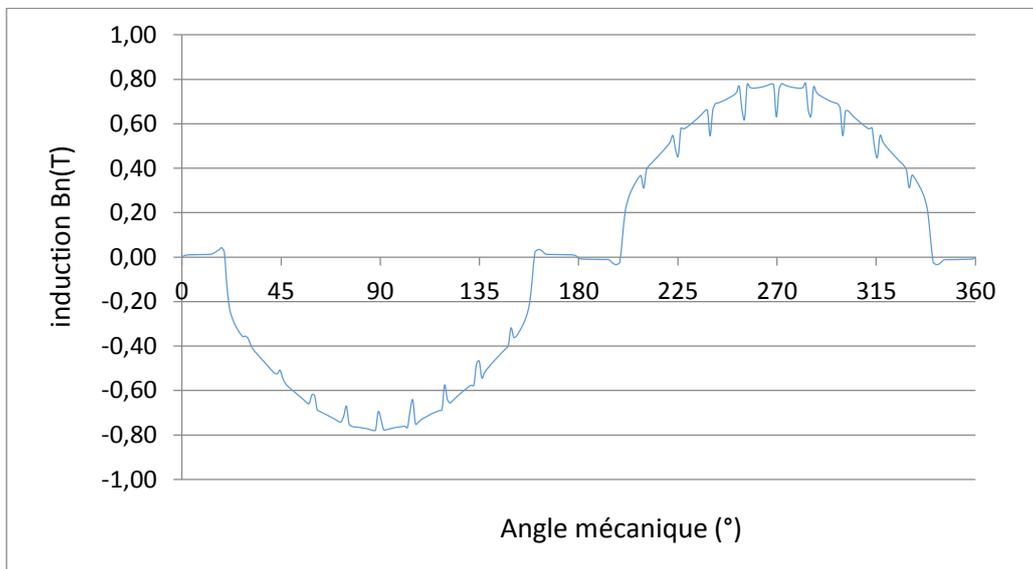


Figure 3-6: induction magnétique le long de l'entrefer pour une ouverture ($\beta=150^\circ$)

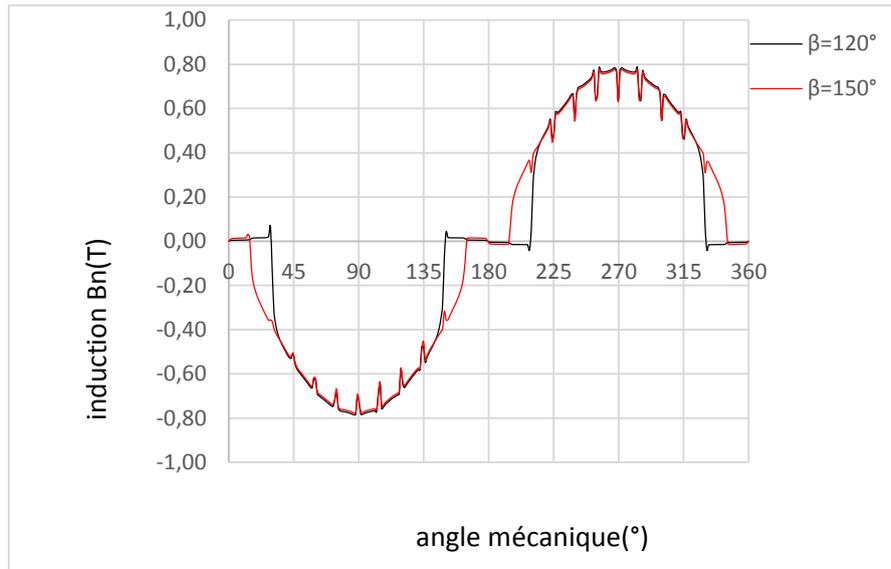


Figure 3-7: induction magnétique le long de l'entrefer pour les ouvertures d'aimants ($\beta=120^\circ$ et $\beta=150^\circ$)

b) Influence de l'épaisseur de l'aimant.

Les figures 3.8 à 3.12 représentent la variation de l'induction magnétique relevé le long d'un contour situé au milieu de l'entrefer de la MSAP pour une ouverture des aimants fixe (120° et pour des épaisseurs des aimants variables.

Nous pouvons déduire que l'augmentation de l'épaisseur des aimants, pour une ouverture fixée, ne modifie en rien l'allure de la caractéristique de l'induction magnétique mais fait varier l'amplitude maximale qui est de 0.78 T pour une épaisseur de 3 mm et de 0.95 T pour une épaisseur de 9.3 mm.

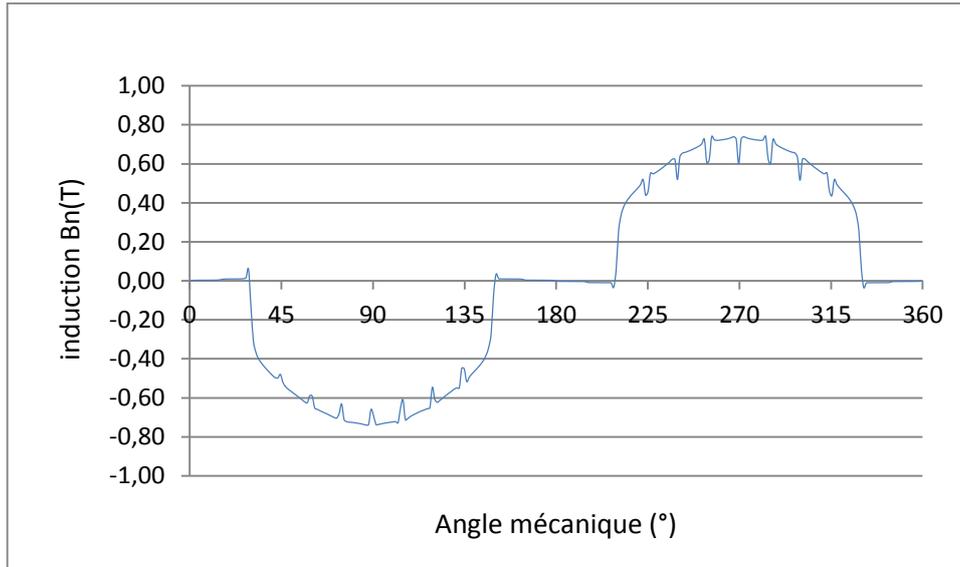


Figure 3-8: induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 2.4 mm

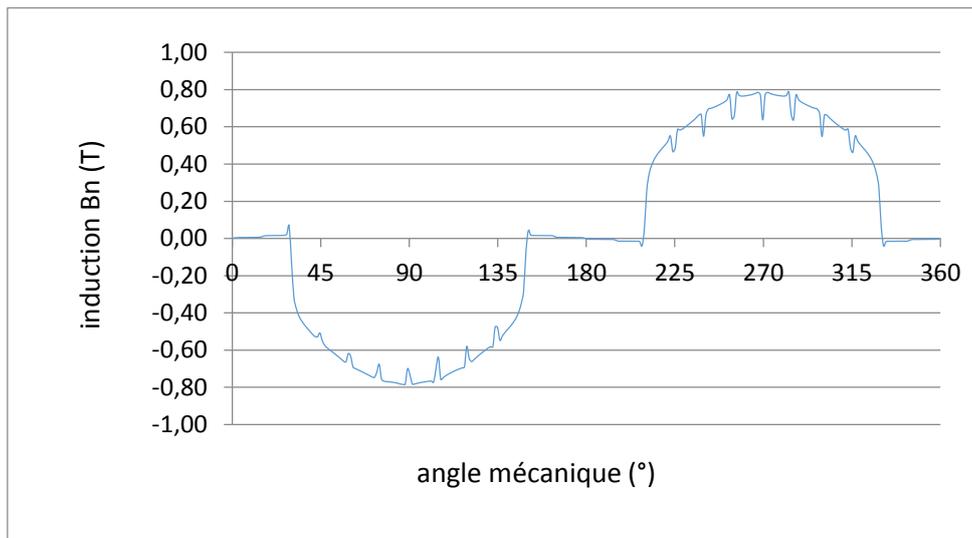


Figure 3-9: induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 3 mm

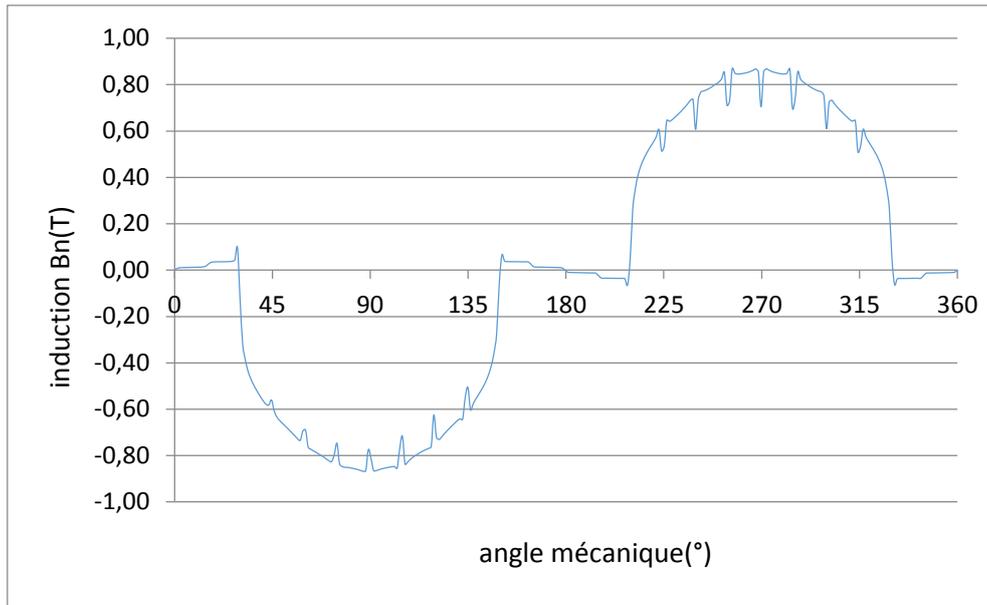


Figure 3-10: induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 4.7 mm

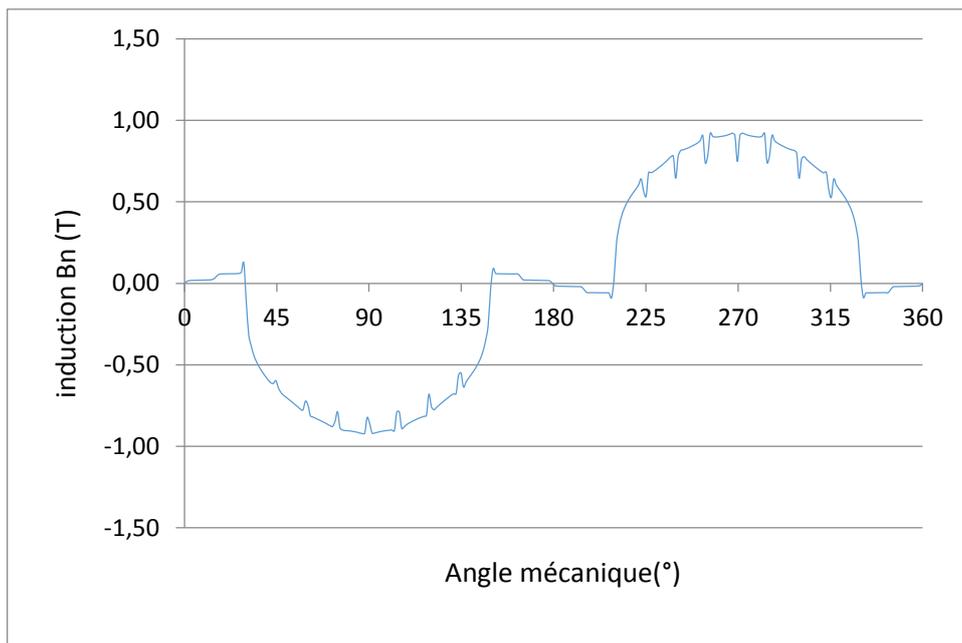


Figure 3-11: induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 7 mm

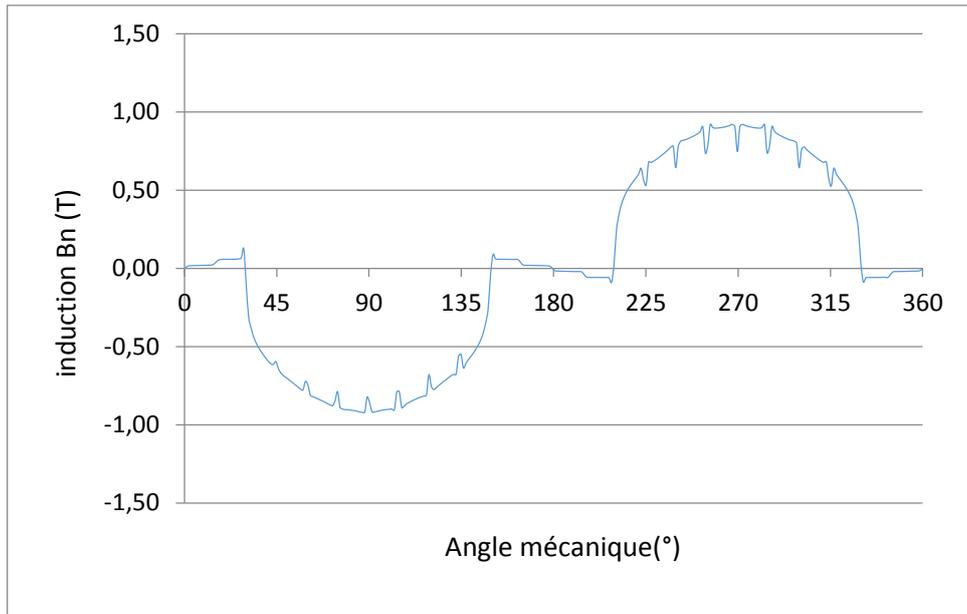


Figure 3-12: induction magnétique le long de l'entrefer pour une épaisseur de l'aimant de 9.3 mm

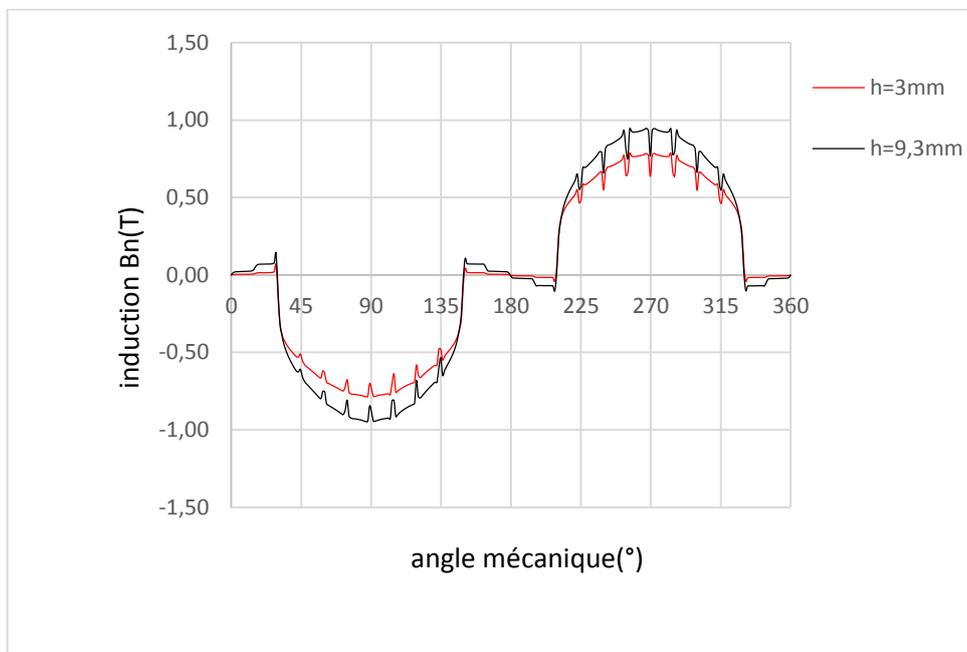


Figure 3-13: induction magnétique le long de l'entrefer pour les épaisseurs de l'aimant de 3 mm et de 9.3 mm.

La figure 3.14 représente les valeurs maximales de l'induction magnétique le long de l'entrefer créée par les aimants permanents seuls en fonction de l'épaisseur des aimants. Cette figure montre que l'induction maximale obtenue face aux aimants augmente au fur et à mesure de l'augmentation de l'épaisseur des aimants. Cette augmentation ne serait pas importante pour des grande épaisseurs (au-delà de 9 mm).

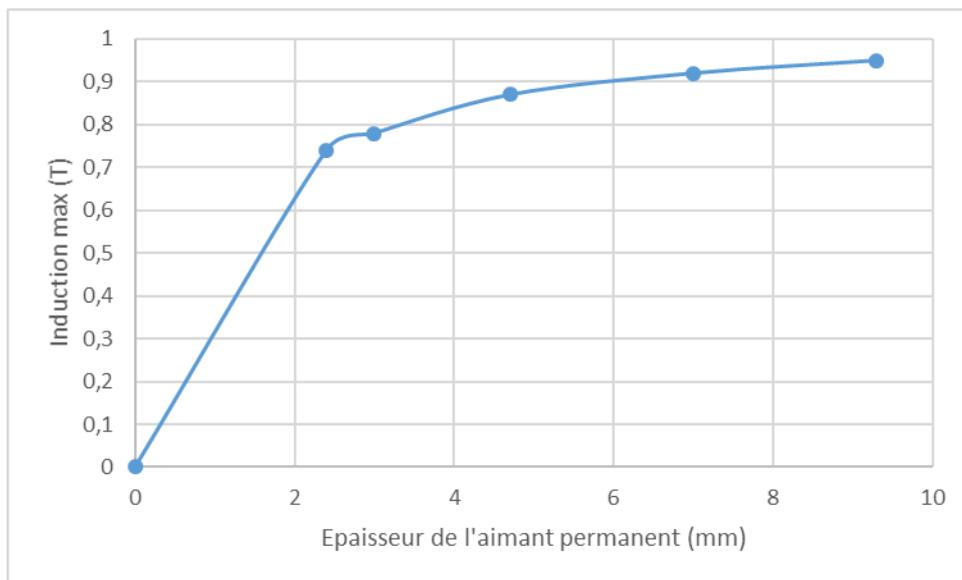


Figure 3-14: induction magnétique maximale dans l'entrefer en fonction de l'épaisseur de l'aimant

3.3.2 Influence sur le flux magnétique par phase.

En considérant un bobinage triphasé réparti à raison de 4 encoches par phase et avec des bobines de 50 spires chacune, le logiciel femm permet, via un script lua, de relever la variation du flux magnétique engendré par les aimants en présence dans chacune des phases.

Les aimants créent une force magnétomotrice dans l'entrefer, la rotation du rotor inverse la polarité du flux traversant chaque phase statorique assujetti au champ d'excitation statorique.

Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence de la variation de l'angle d'ouverture des aimants permanents ainsi que de son épaisseur sur les formes et les amplitudes des flux magnétiques engendrés dans les phases de la machine étudiée.

Nous avons d'abord fixé l'épaisseur des aimants à $h = 3$ mm et fait varier les ouvertures des aimants et retenu les angles suivants : 110° , 120° , 130° , 140° , 150° .

Nous avons ensuite fixé un angle d'ouverture de 120° et déterminé les caractéristiques de la machine pour les épaisseurs des aimants suivants : $h = 2.4, 3, 4.7, 7, 9.3$ mm

a) Influence de l'ouverture de l'aimant.

La figure 3.15 montre à titre d'exemple les flux magnétiques des 3 phases pour 2 ouvertures d'aimants correspondant à 120° et 150° .

Les allures des 3 courbes , déphasées l'une de l'autre de 120° , restent identiques et ne sont pas influencées. C'est au niveau des amplitudes que se manifeste l'influence de la variation de l'ouverture des aimants.

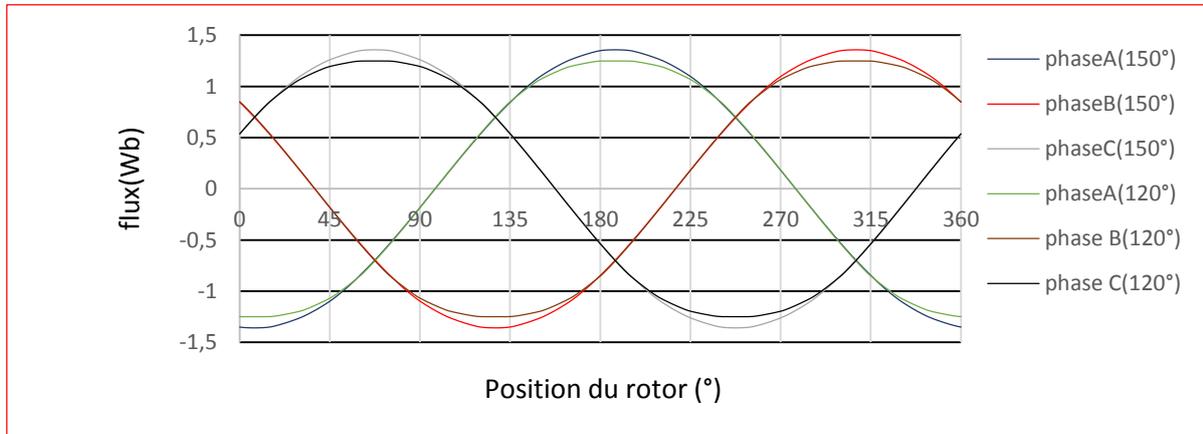


Figure 3-15: variation de flux magnétique en fonction de la position du rotor pour les ouvertures d'aimants ($\beta = 120^\circ$ et $\beta = 150^\circ$)

La figure (3.16) représente les valeurs maximales du flux de phase (A) en fonction de l'angle d'ouvertures des aimants (110° 120° 130° 140° 150°). On constate que l'amplitude du flux augmente, au fur et à mesure de l'augmentation de l'ouverture des aimants.

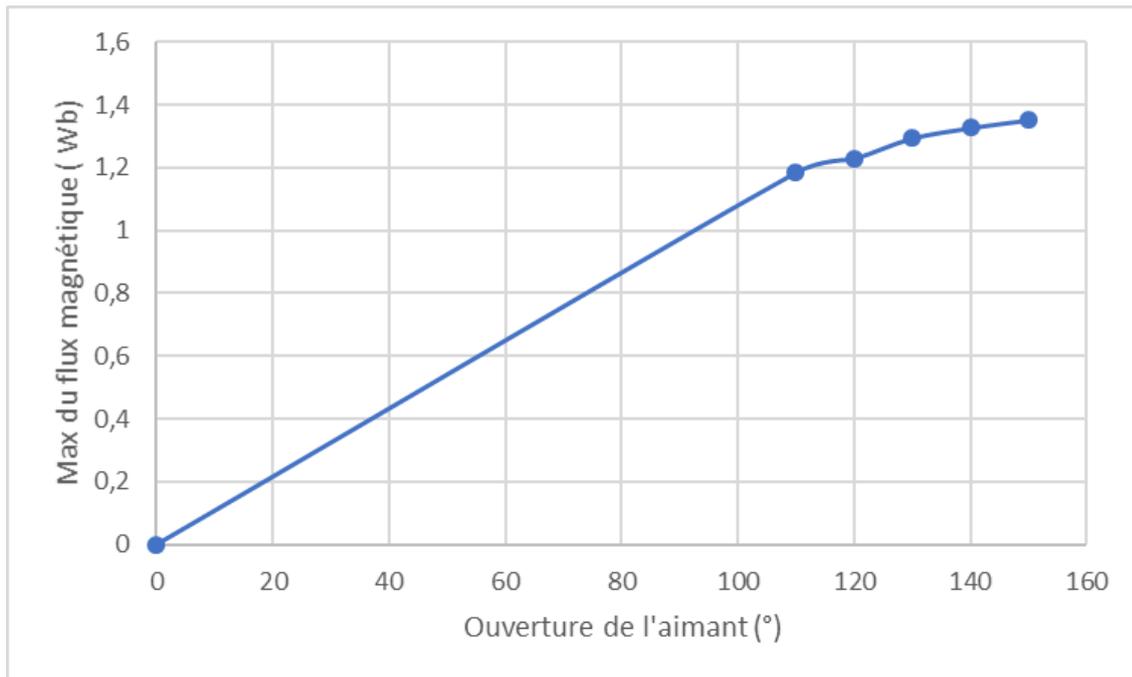


Figure 3-16: Flux maximum par phase en fonction de l'ouverture des aimants

b) Influence de l'épaisseur de l'aimant.

La figure 3.17 montre à titre d'exemple les flux magnétiques des 3 phases pour 2 épaisseurs d'aimants correspondant à 3mm et 9.3 mm

Les allures des 3 courbes, déphasées l'une de l'autre de 120°, restent identiques et ne sont pas influencées. C'est au niveau des amplitudes que se manifeste l'influence de la variation de l'épaisseur des aimants. Ces amplitudes augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur. Le flux magnétique étant proportionnel à l'induction magnétique dans l'entrefer.

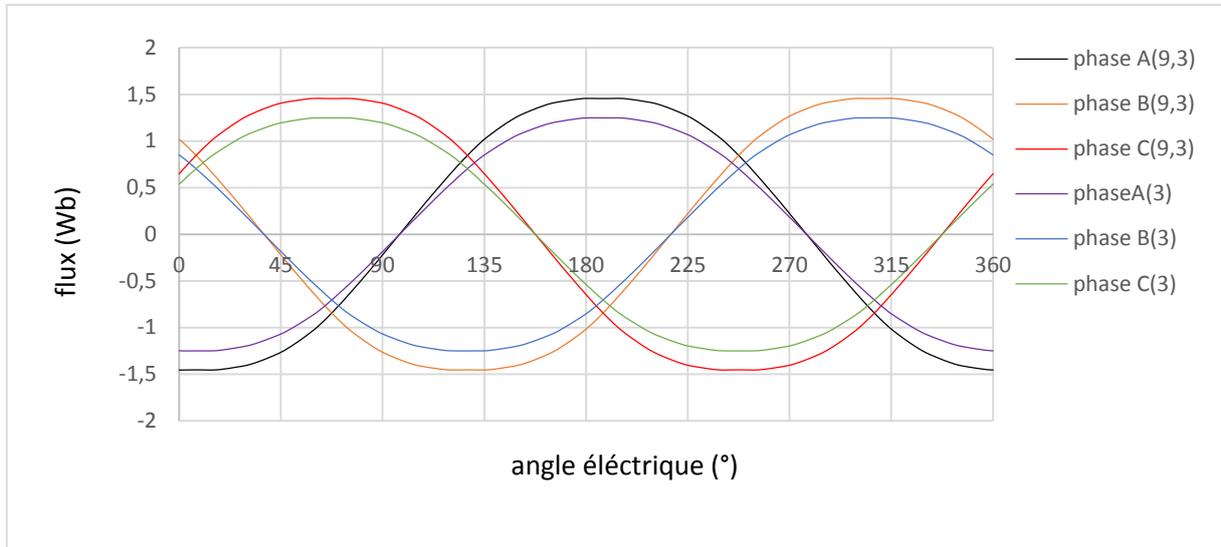


Figure 3-17 : variation de flux en fonction de l'angle électrique par rapport au épaisseurs des aimants

La figure (3.18) représente les valeurs maximales de flux par phase pour différentes valeurs des épaisseurs des aimants (2.4 ,3,4,7,7,9.3) mm On constate que l'augmentation des épaisseurs des aimants augmente l'amplitude du flux magnétique par phase.

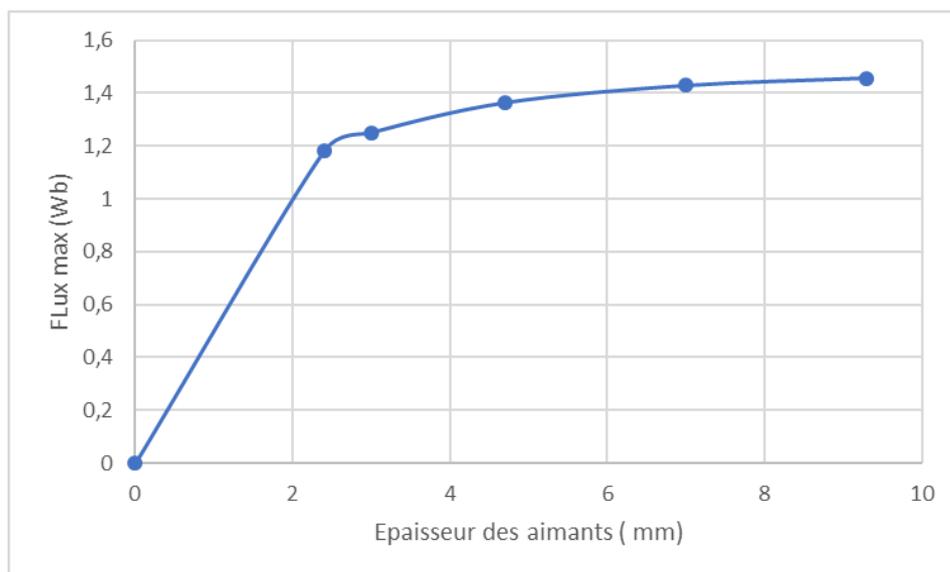


Figure 3-18 variation du flux en fonction des épaisseurs des aimants

3.3.3 Couple électromagnétique

Les échanges électromécaniques d'énergie entre le rotor et le stator de la machine sont entièrement définis si l'on connaît les distributions du champ sur une surface séparatrice S placée dans l'entrefer.

Le couple électromagnétique est facilement déterminé en sélectionnant un contour fermé le long de l'entrefer.

En alimentant une phase par un courant constant, on détermine la variation du couple électromagnétique en fonction de la position du rotor. C'est une autre caractéristique statique essentielle pour la machine électrique.

La figure 3.19 montre l'allure du couple électromagnétique d'une phase en fonction de la position du rotor pour un courant de phase nominal $I_n=5A$.

Le couple maximal est obtenu pour des angles électriques voisins de 90° .

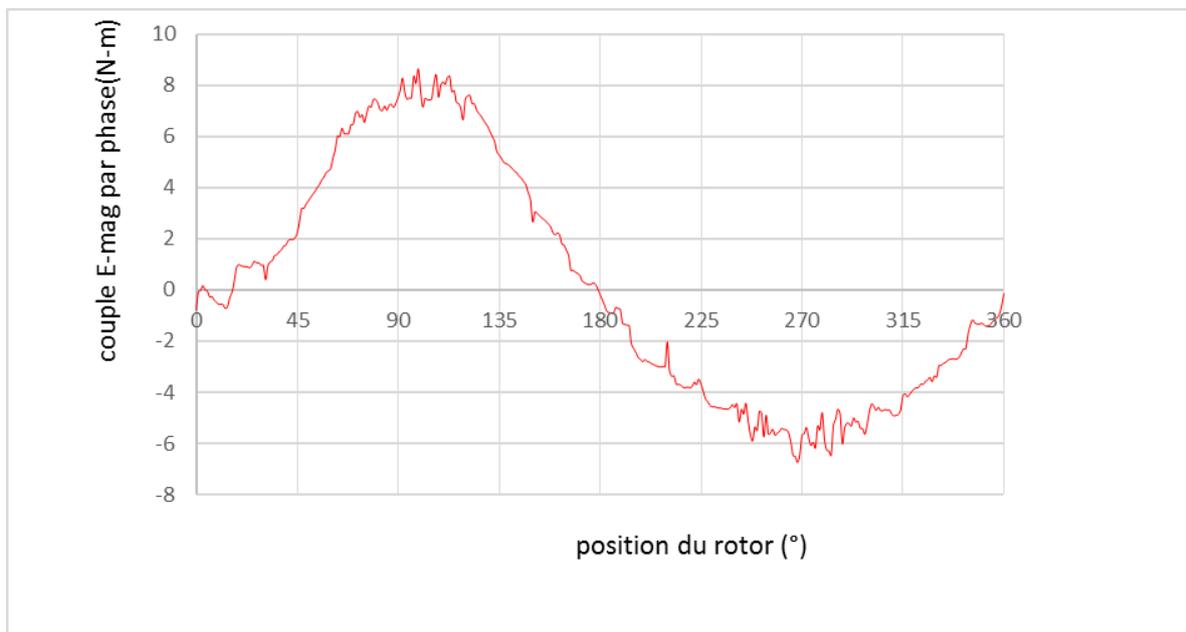


Figure 3-19 : Allure du couple électromagnétique

3.3.4 Couple de détente

Lorsque les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une réluctance variable. Cette variation de la réluctance entraîne un couple de valeur moyenne

nulle que l'on appelle couple de détente. Pour tenter de l'annuler, les encoches peuvent être inclinées d'un pas d'encoche, mais cela rend plus difficile l'opération de bobinage. Il est préférable d'incliner les aimants (ou l'aimantation des pôles) plutôt que les encoches.

La figure 3.20 montre l'allure du couple de détente de la machine étudiée. Ce couple est dû à l'interaction entre les deux aimants permanents présents sur la surface du rotor et les dents statoriques qui leur font face. Il est déterminé par la méthode des éléments finis en imposant un courant nul dans les trois phases de la machine. Le couple ainsi obtenu présente pour la machine étudiée, une amplitude généralement faible.

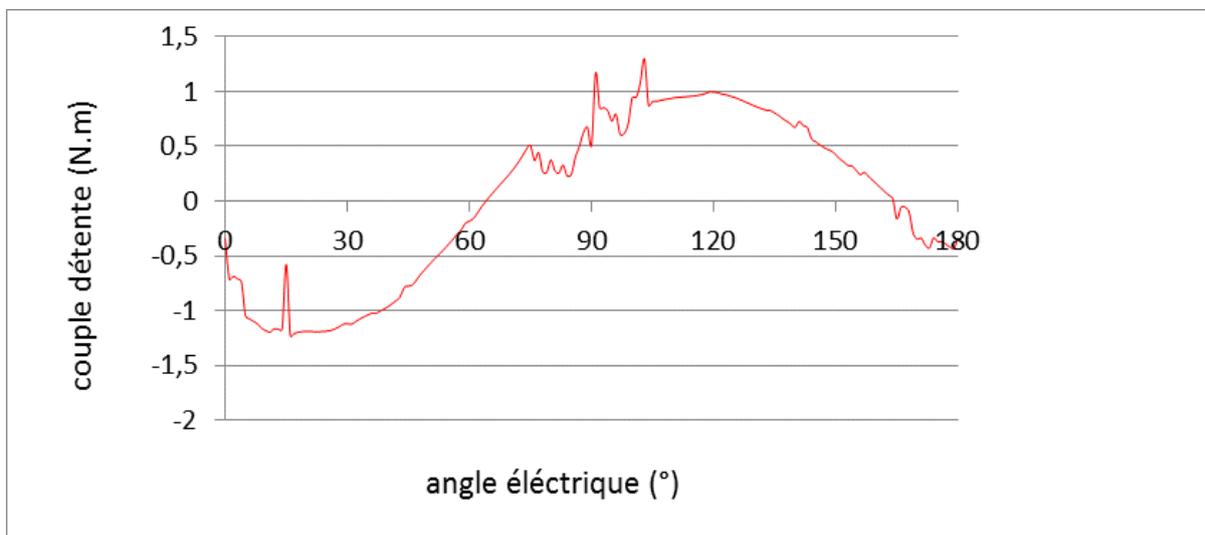


Figure 3-20 : Couple de détente de la MSAP

3.3.5 Force électromotrice (FEM) par phase

La FEM par phase induite par les aimants en présence est donnée par :

$$e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi}{d\theta} \cdot \frac{2\pi}{60} n \quad (3.1)$$

Où

ψ représente le flux magnétique dû aux aimants en présence.

θ est l'angle du rotor

n la vitesse de rotation en tr/min ici 3000 tr/mn ($2p= 2$ pôles).

Pour obtenir les courbes des FEM, nous avons utilisé les courbes du flux par phases, obtenues précédemment grâce au logiciel FEMM..

La force électromotrice, dérivée du flux, est obtenue en utilisant un programme MATLAB qui après un lissage de la courbe de ce dernier. Les valeurs lissées du flux au point M s'obtiennent en déterminant la parabole qui passe au mieux entre les points M_{-2} , M_{-1} , M, M_{+1} et M_{+2} . Une fois déterminée l'équation de la parabole, la dérivée est aisée à trouver et la FEM aussi.

La figure 3.21 montre le tracé des forces électromotrices induites dans les trois phases de la machine pour une vitesse de rotation de 3000 tr/min. L'épaisseur de l'aimant est de 3 mm et l'ouverture de l'aimant est de 120° .

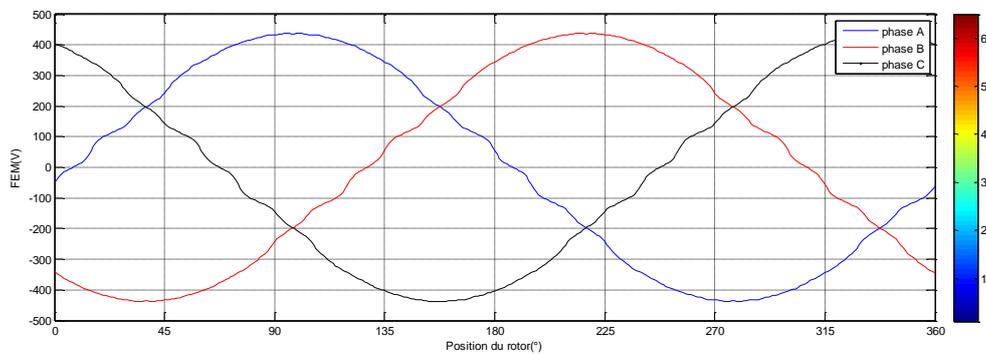


Figure 3-21:FEM en fonction de la position du rotor pour une ouverture de l'aimant de 120°

La figure 3.22 montre le tracé de la force électromotrice induite dans la phase 1 de la machine pour une vitesse de rotation de 3000 tr/min pour différentes ouvertures de l'aimant.

Il apparaît que la modification de l'angle d'ouverture de l'aimant n'a pas d'influence sur l'amplitude de la FEM. Il modifie par contre l'allure de la courbe en la rendant plus proche de la sinusoïde lorsque l'ouverture de l'aimant est assez élevée.

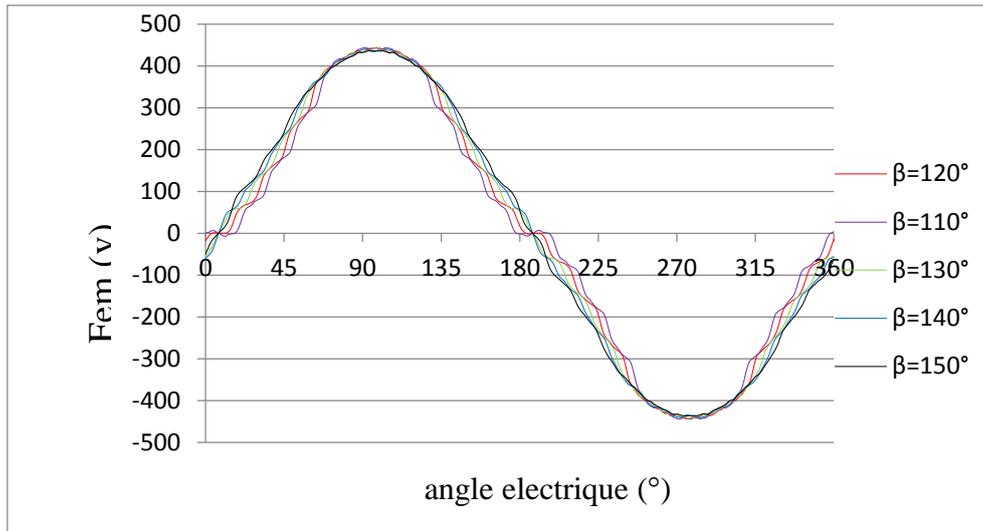


Figure 3-22:FEM de la phase 1 fonction de la position pour des ouvertures d'aimants variables.

La figure 3.23 montre le tracé de la force électromotrice induite dans la phase 1 de la machine pour une vitesse de rotation de 3000 tr/min pour différentes épaisseurs de l'aimant. ($\Theta=\Omega t$) Il apparaît que la modification de l'épaisseur de l'aimant n'a pas d'influence sur l'allure de la FEM. Il modifie par contre l'amplitude de la valeur maximale de la FEM. Cette dernière augmente au fur et à mesure que l'épaisseur de l'aimant augmente. Comme le montre aussi la figure 3.24.

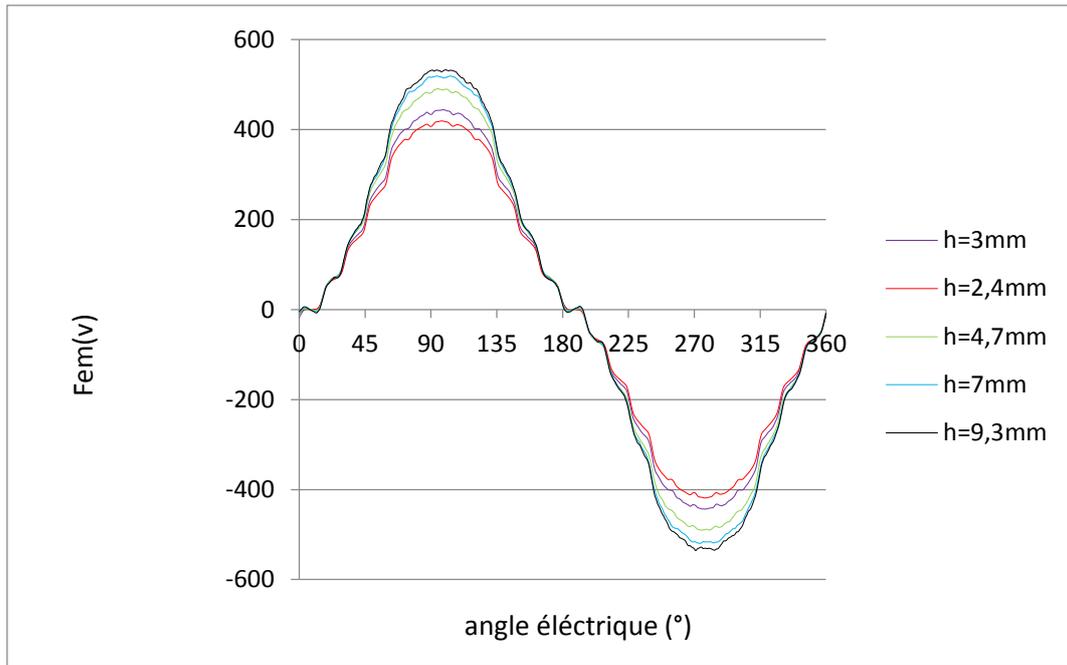


Figure 3-23:FEM de la phase 1 fonction de la position pour des épaisseurs d'aimants variables.

La figure 3.24 montre l'amplitude maximale de la FEM en fonction de l'épaisseur des aimants. L'augmentation de l'épaisseur influe certes l'amplitude de la FEM en l'augmentant mais pas de façon linéaire. Il apparaît qu'à partir de 5 mm le circuit magnétique se sature et la FEM n'augmente presque plus.

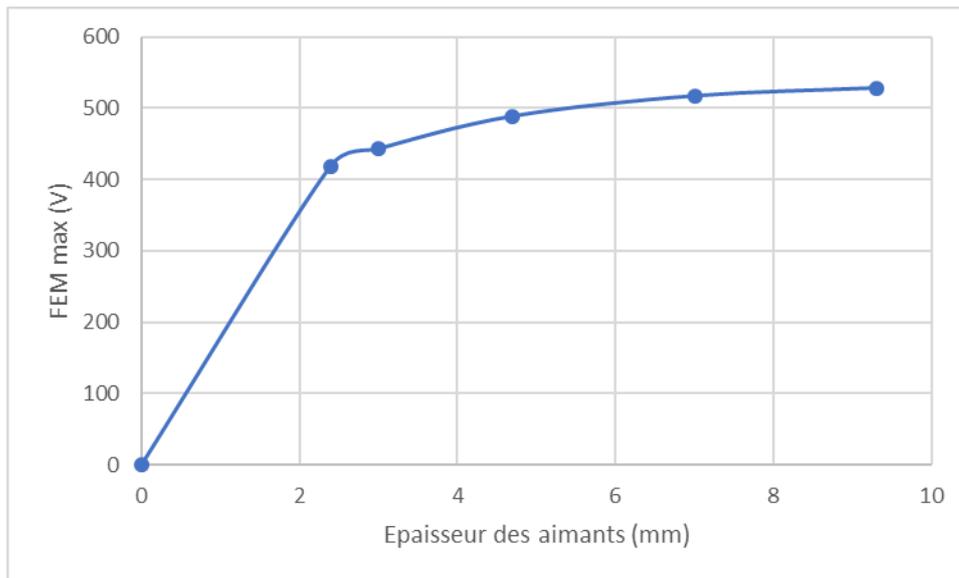


Figure 3-24:variation de la FEM en fonction des épaisseurs des aimants

3.4 Conclusion

A travers de ce chapitre, l'application de la méthode des éléments finis a été utilisée pour la modélisation électromagnétique dans le cas statique d'une machine à aimants permanents non linéaire. Ceci est réalisé par la mise en œuvre des programmes de résolution par éléments finis avec le logiciel d'accès libre FEMM et aussi le logiciel MATLAB. On a représenté l'induction dans l'entrefer, le flux magnétique ainsi que les graphiques des couples de détente et du couple de phase et la FEM. Les résultats ont montré que les aimants permanents (leur volume) ont une influence sur la variation de la FEM et les autres paramètres.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les aspects liés à la conception des machines électriques à aimants sont multiples. Ils concernent le type d'aimant, la structure de la machine, le mode d'alimentation et le type de commande qu'on ne peut dissocier.

Le travail réalisé, dans le cadre de ce mémoire, a permis de déterminer la Fem induite dans les enroulements de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Dans le premier chapitre nous avons présenté les généralités sur les machines synchrones en particulier la machine synchrone à aimant permanent.

Le second chapitre concerne la modélisation par éléments finis de la machine d'étude (MSAP), ainsi qu'au logiciel (FEMM) utilisé dans la conception et la modélisation de notre machine.

Le troisième chapitre de ce mémoire concerne la modélisation et la simulation de la machine électrique étudiée (machine synchrone à aimants permanents insérés). L'influence des paramètres géométriques (épaisseur et angle d'ouverture des aimants permanents) sur les performances de la machine étudiée nous ont permis de mettre en évidence les inductions magnétiques, le couple de détente, couples de phase et les flux ainsi que la FEM induite. L'épaisseur des aimants influent sur les amplitudes des caractéristiques alors que l'angle d'ouverture en modifie les allures.

D'après l'étude de la machine synchrone à aimants permanents insérés, les meilleurs résultats obtenus sont pour un angle d'ouverture 150° et un épaisseur 5mm.

Le logiciel de calcul FEMM basé sur la méthode des éléments finis s'avère efficace pour la détermination des caractéristiques électromagnétiques des machines.

Références bibliographiques

- [1] BAGHDADI BENDAHA Mansour « Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel », Thèse magister d'état,USTO,Oran,Algerie, fevrier 2015
- [2] Pierre Mayé : Aide Mémoire Electrotechnique. édition Dunod , Paris, 2006
- [3] Guy Chateigner, Michel Boès, Daniel Bouix, Jacques Vaillant et Daniel Verkindère. MANUEL DE GÉNIE ÉLECTRIQUE. édition Dunod, Paris, 2006
- [4] Z. Huang, X. Huang, J. Zhang, Y. Fang, Q. Lu, “ Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Traction Motor for High Speed Railway Applications”, Power Electronics Machines and Drives (PEMD) ,Mars 2012 ,University Bristol ,UK.
- [5]R. Ibtouen : « Contribution au dimensionnement électromagnétique d'une machine synchrone autopilotée à aimants insérés », Thèse doctorat d'état, ENP, Alger, Algérie, avril. 1993
- [6] L. Hadjout : « Analyse des performances électromagnétiques d'une machine synchrone autopilotée à aimants à rotor lisse », Thèse Magister, ENP, Alger, Algérie, juin. 1994
- [7] Liva Eric Radaorozandry : Conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique. Mémoire pour l'obtention du grade de maîtrise es sciences, université Laval, 2007.
- [8] G. Verez, H. Tiegna, G. Barakat, O. Bennouna, G. Hoblos et Y. Amara, “Analytical Study of Vibrations of Electromagnetic Origins in Short Permanent magnet Synchronous motors”, ELECTRIMACS 2014, 19th -22nd May 2014, Valencia, Spain, pp. 23–29.
- [9] Z. Huang, X. Huang, J. Zhang, Y. Fang, Q. Lu, “ Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Traction Motor for High Speed Railway Applications”, Power Electronics Machines and Drives (PEMD) ,Mars 2012 ,University Bristol ,UK.

[10] Han SY, Bignon J , Sabonnadière JC . « An upwind finite element method for electromagnetic field problems in moving media », International Journal for Numerical Methods in Engineering Vol.24.pp.207 1-2086,1987.

[11] Mme Hamecha Samira, Ep Bourekache « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » Mémoire de magister en électrotechnique université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2013

[12] R.Saou, "Modélisation et optimisation de machines lentes à aimants permanents : Machines à double saillance et à inversion de flux", Thèse de doctorat d'état, ENP d'Alger, 2008

[13] A.Parviainen., "Design of axial flux permanent magnet low speed machines and performance comparison between radial flux and axial flux machines," thèse de Doctorat, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2005.

[14] BOUKAIS Boussad, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimants permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012

[15] Bernard MULTON, "Application des aimants aux machines électriques ", notes de cours version 2009. Ecole normale supérieure de Cachan. <http://e-mecatronique.bretagne.ens.cachan.fr>

[16] Dhat .D, Touzout. G, « Une présentation de la méthode des éléments finis », Edition Maloine,Paris 1984.

[17] F. Gillon : Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électroniques, Thèse doctorat, université de Lille, France, Décembre 1997]

[18] Lompard P, Meunier G, « Coupling Between Magnetic Field and Circuit Equation in 2D » Proceeding of the International Workshop on Electric and Magnetic Fields from Numerical Models ti Industrial Application,pp 7.1-7,6,Liege,September 1992.

[19] Huguette TIEGNA, « Contribution à la modélisation analytique des machines synchrones à flux axial à aimants permanents à attaque directe en vue de leur dimensionnement. Application aux éoliennes. » Thèse doctorat, université du havre, France, Décembre 2013.

[20] Jean-Michel Courty, note de cours «électromagnétisme et optique »
www.edu.upmc.fr/physique/