

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

Machine Électrique

Thème

Calcul par éléments finis d'une M.S à aimants permanents

Présenté par :

BENSLIMANE Abdelhafid
BEZZIOUNE Karim

Proposé et dirigé par:

Mr R.SAOU

Année universitaire: 2018/2019

Remerciements

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département de génie électrique de l'université de Bejaia.

Louange à Allah le tout puissant qui m'a accordé la santé et la patience durant toutes ces années, pour que je vienne aujourd'hui et présenter ce travail.

Je tiens à remercier mon encadreur Mr. Rachid Saou, pour son aide et ses conseils précieux.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury qui m'ont honoré en acceptant de juger ce travail.

Je remercie tous les enseignants du département génie électrique. Mes remerciements vont aussi à toute ma famille et à tous mes amis pour leur aide et leur soutien.

Dédicaces

Dédicace

*Je dédie le fruit de mon travail à mes chers parents
qui m'ont soutenu, aidé afin que je réussisse dans la vie,
alors j'aimerais bien en profiter de cette occasion pour
les remercier pour tous ce qui m'offrent, que le bon dieu
me les garde et les protège.*

*A ma grand mère, mes frères et sœurs Rabah, Lyes
et Soraya, Sylia, Malika.*

Mon petit ange Alinas.

*A mes amis Melissa en particulier Nabil, Ghanou,
Mounir, Kiki, Adel, Smail et Yanis.*

KARIM

Dédicaces

Je dédie mon travail avant tout à

Ma MERE et Mon PERE.

A HAKIM et HOURIA et le petit RIAD.

A NADIA & YANIS.

Ma sœur ZORA.

Ma Femme RYMA et toute sa famille.

*Mes amis en particulier Melissa, Sara, Yanis, Nassim,
Ghanou, Smail, Nabil, Adel.*

*A toute la famille Benslimane, mes collègues, mes
amis, ainsi que tous les randonneurs.*

HAFID

Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Abréviation

Introduction générale

Chapitre I :

<i>I.1 Introduction.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2 Constitution de la MS.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3 Différents types de machines synchrones.....</i>	<i>6</i>
<i>I.4 La machine synchrone à aimant permanent.....</i>	<i>6</i>
<i>I.5 Généralités sur les aimants permanents utilisés dans les MSAP.....</i>	<i>7</i>
<i>I.5.1 Valeur magnétiques et physiques des aimants.....</i>	<i>7</i>
<i>I.5.2 Les différents types d'aimants permanents.....</i>	<i>8</i>
<i>I.6 Structures des inducteurs des MSAP.....</i>	<i>9</i>
<i>I.6.1 Structures à flux radial(RFPM).....</i>	<i>9</i>
<i>I.6.1.1 Structures à aimants déposés en surface.....</i>	<i>10</i>
<i>I.6.1.2 Structures à aimant encastrés.....</i>	<i>10</i>
<i>I.6.1.3 Structures à aimants enterrés.....</i>	<i>11</i>
<i>I.6.2 Structures à flux axial (AFPM).....</i>	<i>11</i>
<i>I.7 Fonctionnement de la MSAP.....</i>	<i>13</i>
<i>I.7.1 fonctionnement en mode génératrice (GSAP).....</i>	<i>13</i>
<i>I.7.2 fonctionnement en mode Moteur (MSAP).....</i>	<i>13</i>
<i>I.8 Applications des machines synchrones à aimants permanents.....</i>	<i>13</i>
<i>I.9 Les avantages et inconvénients des MSAP, sont cites ci-dessus:.....</i>	<i>15</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>15</i>

Chapitre2 modélisation de la MSAP

<i>II.1 Introduction</i> :.....	17
<i>II.2 Formulation des équations du champ électromagnétique</i>	17
<i>II.2.1 Equations du champ électromagnétique</i>	17
<i>II.2.2 formulation en potentiel vecteur en magnétostatiques bidimensionnels</i>	20
<i>II.3 Conditions aux limites</i>	21
<i>II.4 Analyse par éléments finis, logiciel utilisé</i>	22
<i>II.4.1 Principe du calcul par éléments finis</i>	22
<i>II.4.2 Présentation du logiciel FEMM</i>	22
<i>II.5 Conclusion</i>	24

Chapitre3 simulation de la MSAP

<i>III.1 introduction</i>	26
<i>III.2 Présentation des deux machines étudiées</i>	27
<i>III.2.1 Caractéristiques géométriques</i>	27
<i>III.2.2 Matériaux utilisés</i>	28
<i>III.2.3 Répartition de l'induction magnétique créée par les aimants permanents seuls</i>	29
<i>III.2.4 Répartition de l'induction magnétique créée par les bobines seules</i>	30
<i>III.3 Caractéristiques statiques de la MS à aimants permanents</i>	30
<i>III.3.1 machine synchrone à aimant déposé en surface</i>	31
a) <i>Flux magnétique du à l'aimant SMCO</i>	31
b) <i>Flux magnétique du à l'aimant NdFeB</i> :.....	31
c) <i>Flux magnétique du à l'aimant Alnico 8</i>	32
<i>III.3.2 machine synchrone à aimants insérés</i>	32
a) <i>Flux magnétique du à l'aimant SmCo</i>	33
b) <i>Flux magnétique du à l'aimant NdFeB</i>	33
c) <i>Flux magnétique du à l'aimant Alnico 8</i>	34
<i>III.3.3 Récapitulatif</i>	34
<i>III.4 Induction magnétique due aux aimants permanents</i>	35

III.4.1	Caractéristiques magnétiques dues aux aimants permanents déposés en surface ..	35
a)	Aimant NdFeB.....	35
b)	Aimant SMCO	36
c)	Aimant alnico 8.....	37
III.4.2	Caractéristiques magnétiques dues aux aimants permanents insérés	38
a)	Aimant NdFeB.....	38
b)	Aimant SMCO	39
c)	Aimant alnico 8.....	40
III.4.3	Récapitulatif.....	41
III.5	inductances et inductances mutuelles des deux machines	42
III.5.1	MS à Aimants déposés en surface	42
II.5.2	MS à Aimants insérés.....	43
II.5.2.1	Cas Linéaire.....	44
II.5.2.2	Non linéaire	46
III.6	Influence de l'angle d'ouverture et de l'épaisseur de l'aimant sur les inductions magnétiques.	47
II.6.1	MS a aimant déposé en surface.....	47
a)	Angle d'ouverture des aimants	47
b)	Epaisseur des aimants	48
II.6.2	MS a aimants insérés	48
A)	Angle d'ouverture	48
B)	Epaisseurs des aimants	49
II.6.3	Récapitulatif.....	50
Conclusion	50
Conclusion générale	51

Liste des Figures

Liste des figures

Chapitre 1

Figure I-1 machine synchrone à aimant permanent.....	3
Figure I-2 cycle d'hystérésis.....	3
Figure I-3 structure à aimant déposé en surface.....	6
Figure I-4 Structure à aimants encastrés.....	7
Figure I-5 Structure à aimants enterrés.....	7
Figure I-6 Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.....	8
Figure I-7 Structure à flux axial avec double rotor et un stator.....	8
Figure I-8 Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.....	8
Figure I-9 Principales applications des machines synchrones à aimants permanents.....	10

Chapitre 2

Figure II-1 Géométrie et Condition aux limites de la MSAP étudiée.....	23
Figure II-2 Maillage d'une MSAP.....	24

Chapitre 3

Figure III-1 architecture des machines étudiées.....	26
Figure III-3 propriétés magnétiques des matériaux utilisés.....	28
Figure III-2 Caractéristiques géométriques des machines étudiées.....	28
Figure III-4 Répartition de l'induction magnétique créée par les aimants permanents seuls.....	29
Figure III-5 Répartition de l'induction magnétique créée par les bobines seules.....	30
Figure III-6 Flux /phase de MSAP avec des aimant SmCo.....	31
Figure III-7 Flux /phase de MSAP avec des aimant NdFeB.....	31
Figure III-8 Flux /phase de MSAP avec des aimants Alnico8.....	32
Figure III-9 Flux /phase de MSAP avec des aimants SmCo.....	33
Figure III-10 Flux /phase de MSAP avec des aimants NdFeB.....	33
Figure III-11 Flux /phase de MSAP avec des aimants Alnico8.....	34
Figure III-12 L'induction magnétique B_n	35
Figure III-13 Le champ magnétique H_t	36
Figure III-14 L'induction magnétique B_n	36
Figure III-15 Le champ magnétique H_t	37

<i>Figure III-16 L'induction magnétique B_n</i>	37
<i>Figure III-17 Champ magnétique H_t</i>	38
<i>Figure III-18 L'induction magnétique B_n</i>	38
<i>Figure III-19 Champ magnétique H_t</i>	39
<i>Figure III-20 L'induction magnétique B_n</i>	39
<i>Figure III-21 Champ magnétique H_t</i>	40
<i>Figure III-22 L'induction magnétique B_n</i>	40
<i>Figure III-23 Champ magnétique H_t</i>	41
<i>Figure III-24 Inductance d'une phase</i>	42
<i>Figure III-25 inductance mutuelle</i>	43
<i>Figure III-26 Inductance statorique</i>	43
<i>Figure III-27 Inductance propre</i>	44
<i>Figure III-28 Inductance propre</i>	44
<i>Figure III-29 Inductance propre</i>	45
<i>Figure III-30 Inductances mutuelles</i>	45
<i>Figure III-31 Inductance propre</i>	46
<i>Figure III-32 Inductance Mutuelles</i>	46
<i>Figure III-33 Induction magnétique B_n</i>	47
<i>Figure III-34 Induction magnétique B_n</i>	48
<i>Figure III-35 Induction magnétique B_n</i>	49
<i>Figure III-36 Induction magnétique B_n</i>	49

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Exemples de propriétés magnétiques des aimants	9
Tableau III.1 : Grandeurs caractéristiques des machines étudiées	27
Tableau III.2 Matériaux utilisés.....	29
Tableau III.3 les flux max.....	34
Tableau III.4 les flux max.....	34
Tableau III.5 Caractéristiques magnétiques des aimants déposé en surface.....	41
Tableau III.6 Caractéristiques magnétiques des aimants insérés.....	41
Tableau III-7 les valeurs max des inductions magnétiques.....	50

Nomenclature

\vec{E}	Champ électrique (V/m)
B	Induction magnétique (tesla)
B_r	La rémanence (tesla)
\vec{H}	Champ magnétique (A/m)
H_c	Champ coercitif
T_{max}	Température (°C)
T	Temps (s)
$\frac{\partial D}{\partial t}$	Densité de courant déplacement [A.m ²]
\vec{D}	Vecteur induction électrique [C/m ²]
ρ	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 Machinesynchrone 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

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. Le 19^{ème} siècle fût une période importante dans l'histoire de l'électricité, Tout Commence en 1821 lorsque le chimiste Danois Oersted découvre le phénomène de l'électromagnétisme, ensuite le physicien Michael Faraday construit un appareil qui produit une rotation électromagnétique ce qui lui a permis d'inventer le principe du moteur électrique. Ainsi en 1832 Andrés Marie Ampère réussit à réaliser une des première machines à courant continu et en 1883 Nicolas Tesla inventa la première machine à induction. C'est donc petit à petit que l'évolution de la machine électrique se construisit, mais ce processus d'évolution ne s'arrêtera pas ici ; au milieu du 20^{ème} siècle, l'électronique de puissance pour la commande des machines électrique a connu une évolution rapide par l'avènement des thyristors en 1960, puis les G.T.O, I.G.B.T ,M.O.S...etc. Et sans oublier l'apparition des microprocesseurs en 1970 et aussi la découverte de nouveaux matériaux [1].

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 des machines tournantes (machine à courant continu et la machine à courant alternatif) et dans les machines à courant alternatif on trouve les machines asynchrone et les machines synchrone (à rotor bobiné, à reluctance variable, à double excitation et à aimant permanent).

Dans notre travail, nous allons nous intéresser à la machine synchrone à aimants permanents dont l'utilisation a augmenté d'une façon spectaculaire dans l'industrie et ceci grâce à ses avantages par rapport à d'autres types de machines électriques. Les avantages sont un couple massif très élevé par rapport à l'inertie, une taille compacte et des pertes rotoriques réduites par l'absence de l'alimentation dans le rotor. En plus de sa haute densité de puissance, elle nous donne la possibilité de l'utiliser en hautes vitesses, permettant d'éliminer les éléments de transmission mécanique et donc d'augmenter le rendement de l'ensemble.

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 à la fin de ce chapitre a été abordé le fonctionnement de cette machine ainsi que les domaines d'applications.

Le deuxième chapitre, concerne la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent. Son modèle basée sur les équations du champ électromagnétique a été présenté et à 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 que sont les MSAP déposés en surface ou insérés, ainsi que leur caractéristiques géométriques puis en première partie on a effectué plusieurs simulation concernant les flux magnétiques engendrés dans les phases des machines étudiées,, les caractéristiques magnétique (B_n , H_t) du aux aimants et terminer avec les inductances propres et les inductances mutuelles entre phases pour les deux machines . Dans la deuxième partie on a effectué des modifications sur les paramètres géométriques de nos machines (épaisseur et angle d'ouverture) et étudié l'influence de ces paramètres sur les performances des machines étudiées.

Nous terminons par une conclusion générale qui clos ce mémoire.

Chapitre 1

Généralités sur la machine synchrone à aimants permanent

Chapitre 1

Généralités sur la Machine synchrone à aimants permanents

I.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 machines électriques dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé 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. 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 déterminé 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.

I.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].

I.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 divers que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse constante et l'attraction. A ces nombreux domaines d'emplois, correspondant 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 synchrone à réluctance
- Les moteurs synchrones à aimant permanent, 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 élevé).

La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport a la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.

I.4 La machine synchrone à aimant permanent

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 harmoniques (provenant de la pulsation du flux et les harmoniques du courant) peuvent démagnétiser les aimants [4].

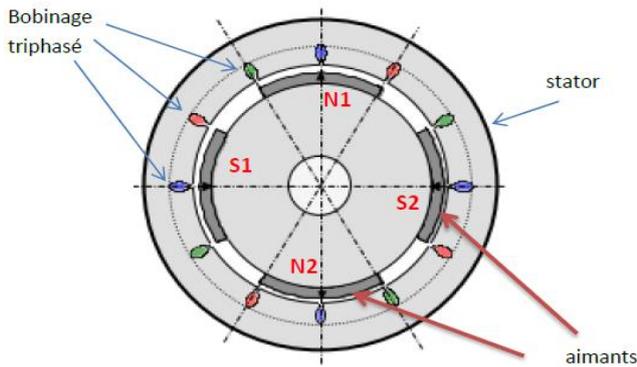


Figure I-1 machine synchrone à aimant permanent

I.5 Généralités sur les aimants permanents utilisés dans les MSAP

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)

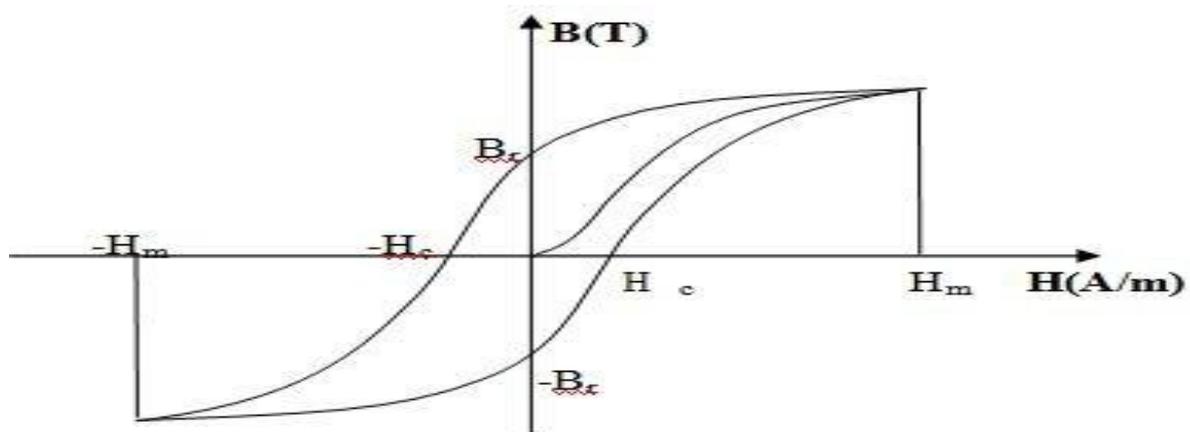


Figure I-2 cycle d'hystérésis

I.5.1 Valeur magnétiques et physiques des aimants

Les aimants ayant des valeurs magnétiques et physiques comme suites :

- **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 millitesla (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/cm³. Si le point de Curie est atteint, tout matériau magnétique perd son magnétisme. Le tableau d'aide au choix ci-dessous 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 part 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 I.1 ci-dessous.

Tableau I.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 $-H_c$ (kA/m)	Température T_{\max} (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co ₅	140-200	1	2000	280	220
Sm ₂ Co ₁₇	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

I.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 le suivant :

I.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 encastrés (Figure I-4) ou enterrés (Figure I-5). [12].

I.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 B_a . 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.

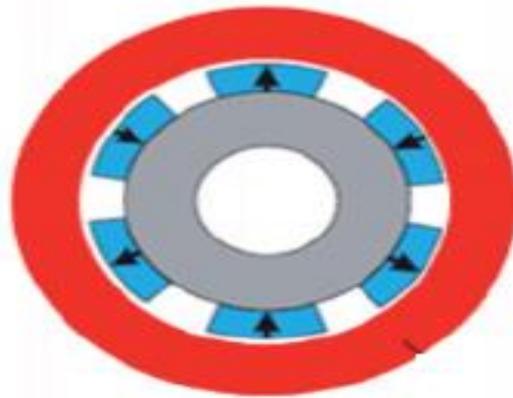


Figure I-3 structure à aimant déposé en surface

I.6.1.2 Structures à aimant encastrés

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 réductance en plus du couple des aimants.

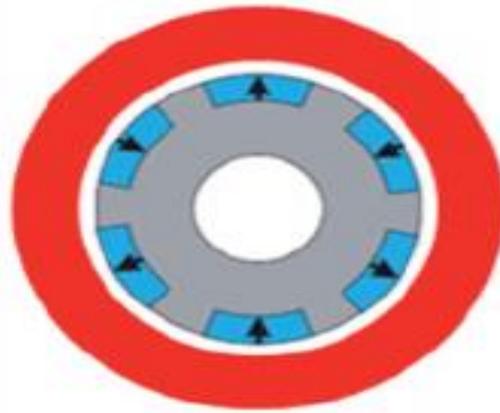


Figure I-4 Structure à aimants encastrés ou insérés

I.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].

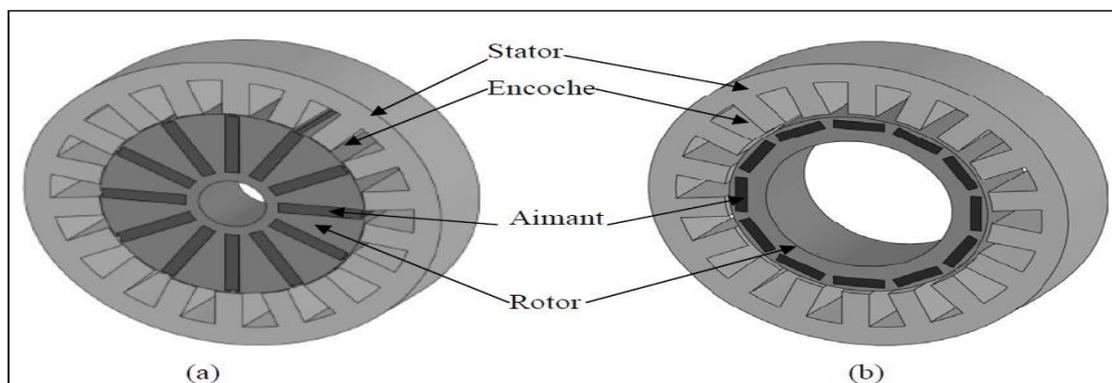


Figure I-5 Structure à aimants enterrés : (a) à concentration de flux, (b) classique

I.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.8) et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors (Figure I.9) ou un seul rotor inséré entre deux stators (Figure I.10). L'exploitation des ces machines dans le domaine de traction (vélo électrique et voiture hybride) est très prometteuse [14,15].

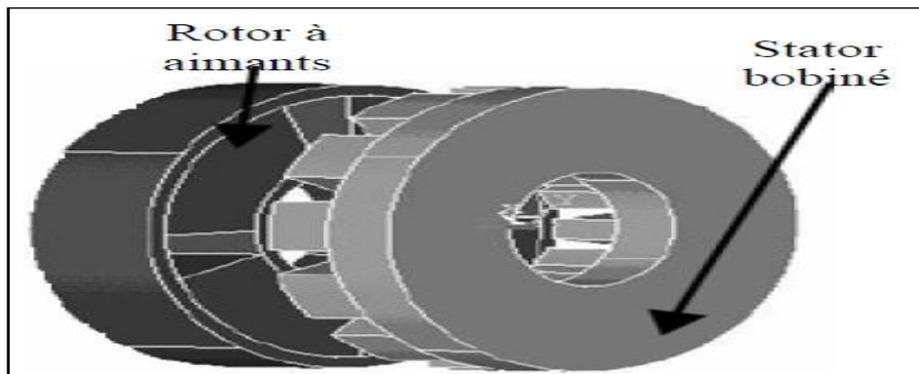


Figure I-6 Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.

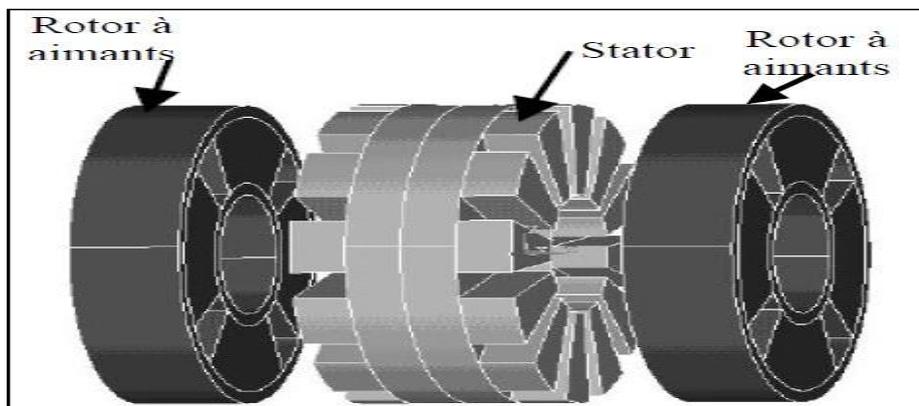


Figure I-7 Structure à flux axial avec double rotor et un stator

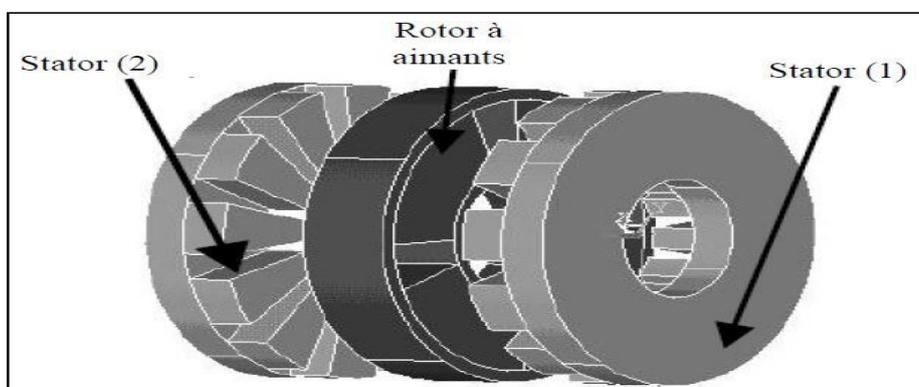


Figure I-8 Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor.

I.7 Fonctionnement de la MSAP

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

I.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.

I.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.

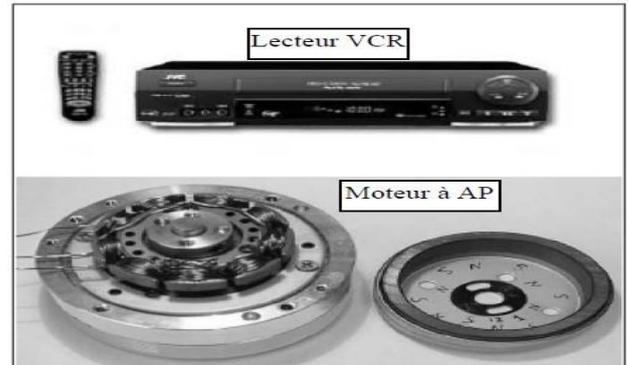
I.8 Applications des machines synchrones à aimants permanents

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. La figure I.11 illustre quelques applications de ces machines. Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers

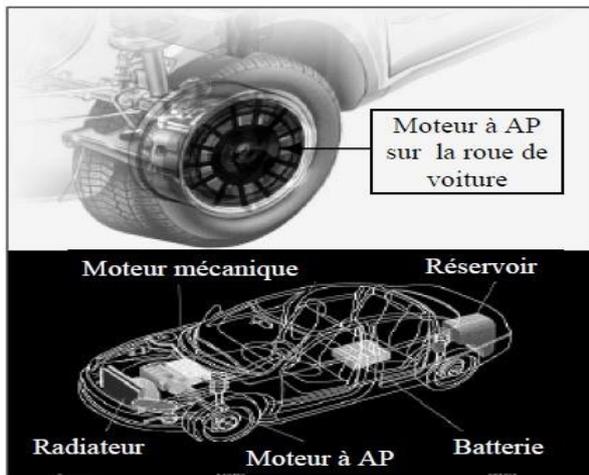
Tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications particulières.



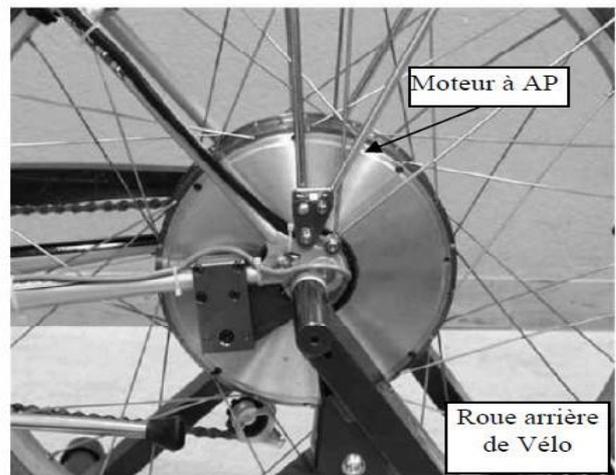
(c) : Lecteurs CD/DVD et disque dur de PC



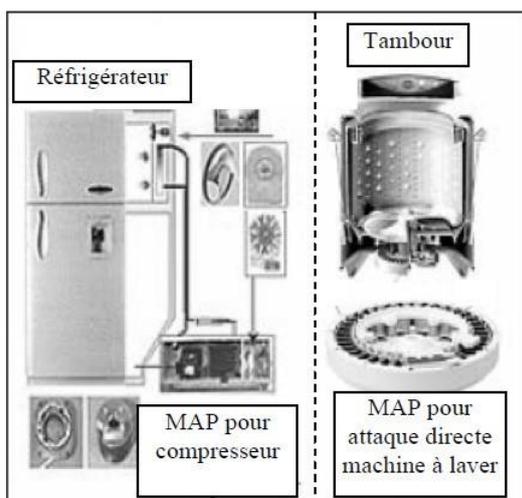
(d) : Lecteur vidéo, VCR



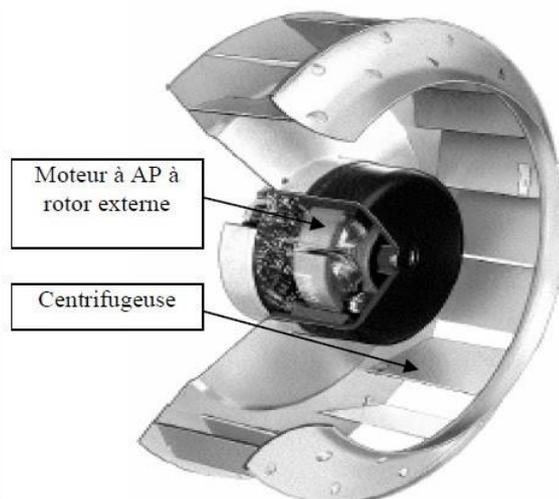
(a) : Voiture Hybride



(b) : Vélo électrique



(e) : Compresseur réfrigérateur et moteur machine à laver



(f) : Moteur d'un ventilateur

Figure I-9 Principales applications des machines synchrones à aimants permanents

I.9 Les avantages et inconvénients des MSAP, sont cites ci-dessus:**❖ Les avantages:**

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes Joule au niveau du rotor ;
- L'absence des collecteurs / balais et des bagues / balais simplifie la construction et l'entretien ;
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique ;
- Puissance massiques élevée ;
- Couples massique et volumique importants ;
- Bon facteur de puissance ;
- A puissance nominale, le rendement d'un moteur synchrone est élevé par rapport un moteur asynchrone ;

❖ Les inconvénients:

- Cout élevé (à cause des prix des aimants)
- Problème de tenu en température des aimants (250°C pour les samarium-cobalt)
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par réaction d'induit
- Impossibilité de régler l'excitation

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur la machine synchrone à aimant permanent 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 des ses machines.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et la mise en équation de la MSAP

Chapitre 2

Modélisation par élément finis d'une MSAP

Chapitre 2

Modélisation par élément finis d'une MSAP

II.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 différentes 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 des machines étudiée dans le cadre de ce travail ainsi que le logiciel utilisé.

II.2 Formulation des équations du champ électromagnétique

II.2.1 Equations du champ électromagnétique

Les équations locales de l'électromagnétique ou équations de Maxwell décrivent le comportement local dans le temps et dans l'espace des grandeurs électriques et magnétiques et leur interaction mutuelles. Les quatre équations suivantes présentent la forme la plus générale des équations de Maxwell

❖ Equation de Maxwell-Faraday

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

→

E: Vecteur champ électrique [V/m].

→

B: Vecteur induction magnétique [T].

❖ *Equation Maxwell-Ampère:*

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

\vec{H} : vecteur champ magnétique (A/m)

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

\vec{J} : Densité de courant [A.m^{-2}].

μ_0 : Perméabilité magnétique de vide [H.m^{-1}]. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

❖ *Equation Maxwell-Gauss :*

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.3})$$

\vec{D} : Vecteur induction électrique [C.m^{-2}].

ρ : Charges volumiques [C.m^{-3}].

❖ *Equation de conservation du flux magnétique*

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

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

On associe aux équations de Maxwell les lois régissant les milieux qu'on appelle aussi les relations constitutives des matériaux,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_0 + \vec{J}_{pm} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

μ : perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductivité électrique (S/m)

ε : Permittivité électrique (F/m).

\vec{J} : Courant induit (A.m^{-2})

\vec{J}_0 : Densité de courant des sources d'alimentation

\vec{J}_{pm} : Densité de courant surfacique équivalente de l'aimant en présence

Les courants de déplacement sont négligeables devant les courants de conduction, la loi d'Ampère (II.2) s'écrit alors :

$$\vec{\nabla} (H) = J$$

La loi de Gauss s'écrit (dans le cadre des systèmes étudiés, on peut considérer que les charges volumiques sont négligées)

$$\vec{\nabla} D = 0$$

L'équation (II.4) nous permet de définir un vecteur potentiel magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \cdot A \quad (\text{II.8})$$

Pour garantir l'unicité de la solution nous utiliserons la jauge de Coulomb, soit

$$\vec{\nabla} A = 0 \quad (\text{jauge de coulomb}) \quad (\text{II.9})$$

à partir des équations de Maxwell et de la relation (II.8) on obtient

$$\vec{E} = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } V \quad (\text{II.10})$$

A partir des relations (II.6) et (II.10), nous pouvons écrire:

$$J = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } V \right) \quad (\text{II.11})$$

à partir de l'équation (II.6) et (II.10) on est amené à résoudre l'équation de diffusion du champ magnétique suivante :

$$\vec{\nabla} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} \right) = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } V \right) + J_0 + J_{pm} \quad (\text{II.12})$$

A et V doivent vérifier l'équation (II.4) tel que

$$\text{Div} \left(-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \text{grad } V + J_0 + J_{pm} \right) = 0 \quad (\text{II.13})$$

De (II.3) on peut déduire :

$$\vec{\nabla} J = 0 \quad (\text{II.14})$$

L'introduction de (III.11) dans (III.14) et en tenant compte de (III.9) donne :

$$\text{grad} \vec{V} = 0 \quad (II.15)$$

le potentiel scalaire V est alors de nature électrostatique et électrocinétique en l'absence de ce type de source on a :

$$\vec{E} = - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (II.16)$$

et le champ E est dit électromoteur

II.2.2 formulation en potentiel vecteur en magnétostatiques bidimensionnels

La formulation en magnétostatique peut être déduite simplement de l'équation (II.12) en annulant le terme σ on obtient:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} A \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_{pm} \quad (II.17)$$

la résolution de cette équation associée aux conditions aux limites est assez complexe analytiquement ou en utilisant une méthode numérique. Pour pouvoir la résoudre on l'a ramène d'ordinaire en 2 D particulièrement pour les machines électriques cylindrique, à flux radiale, ou la machine est considérée suffisamment longue pour considérer un potentiel vecteur électrique ne possédant qu'une seule composante selon l'axe z (axe de la machine) qui ne dépend que de x et y .

L'avantage d'utiliser la formulation de vecteur potentiel est que toutes les conditions à satisfaire ont été combinées en une seule équation

$$\vec{J} = J_z(x,y) \vec{k} \quad \text{et} \quad \vec{A} = A_z(x,y) \vec{k} \quad (II.18)$$

Où k est le vecteur unitaire dans l'axe z .

$$\vec{B} = \nabla (A) = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & A_z \end{bmatrix}$$

Où $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ sont les vecteurs unitaires dans le système cartésien suivant ox, oy, oz après développement on obtient :

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \frac{\partial A_z}{\partial y} \vec{i} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{j}$$

L'équation (II.17) se restreint finalement à l'équation de Poisson suivante

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = - (J_z + J_{pm}) \quad (\text{II.19})$$

II.3 Conditions aux limites

L'équation (II.15) avec les conditions aux limites permet la détermination du potentiel vecteur local A dans son domaine de résolution. Généralement les conditions aux limites peuvent être de types suivants [16] :

Condition de Dirichlet

$$A = A_0$$

À titre d'exemple lorsque le problème possède une géométrie symétrique et les sources sont disposées de manière antisymétrique, on a une condition naturelle de Dirichlet $A = 0$.

Condition de Neumann :

$$\frac{\partial A}{\partial n} \text{ Donné}$$

Cette condition est utilisée pour des problèmes qui possèdent une symétrie géométrique et physique.

Condition de passage

L'application entre le théorème d'Ampère de Gauss donne

$$D_{n1} - D_{n2} = \sigma$$

$$E_{t1} = E_{t2}$$

$$B_{n1} = B_{n2}$$

$$H_{t1} - H_{t2} = J_s$$

σ : conductivité électrique (S/m)

J_s : densité superficielle du courant (A/m)

II.4 Analyse par éléments finis, logiciel utilisé

La résolution par des technique analytique de l'équation (II.19) est souvent limité a des géométries simples. Lorsque le domaine de résolution est non linéaire à géométrie complexe, le recours a des techniques numériques telles que la méthode des différences finis, la méthode des intégrales de frontières la méthode des éléments finis ou encore des méthodes mixtes s'impose

II.4.1 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 tout 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

II.4.2 Présentation du logiciel FEMM

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.

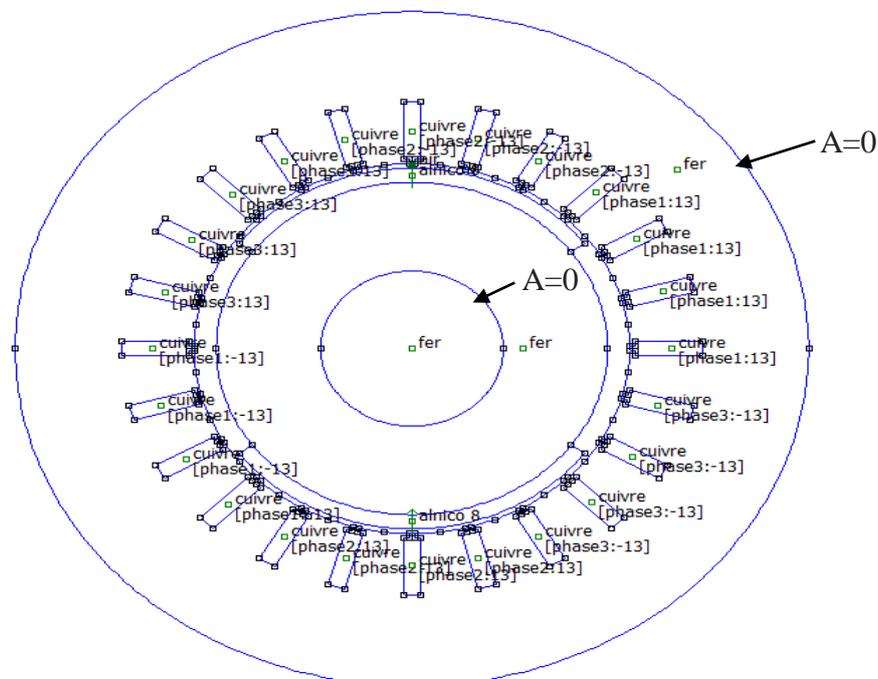


Figure II-1 Géométrie et Condition aux limites de la MSAP étudiée

Dans ce type de condition (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 magnétiques est de définir $A=0$ le long d'une frontière (le flux magnétique ne traverse pas cette frontière).

- **Le mailleur :**

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 (Figure II-4).

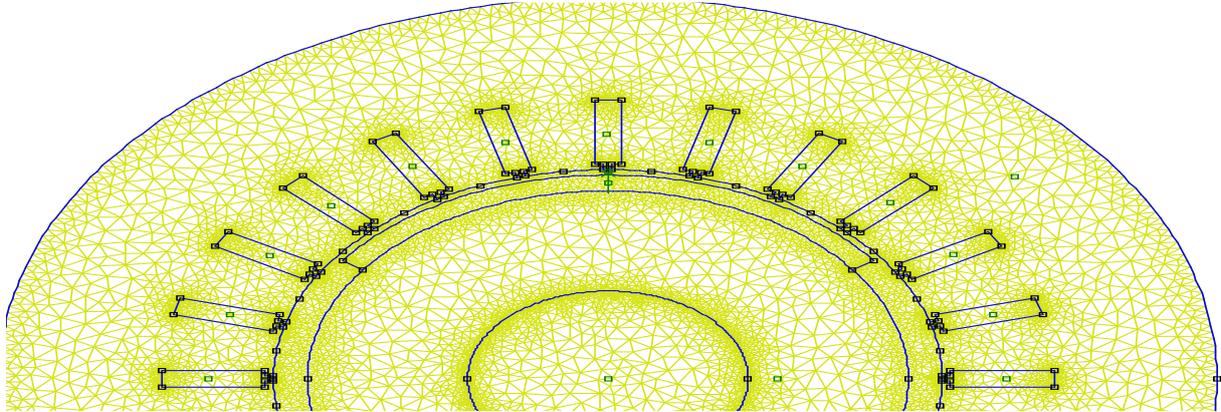


Figure II-2 Maillage d'une MSAP

- **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).

II.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le modèle bidimensionnel de la machines étudiée (Machine Synchrone à Aimants permanents) en utilisant la formulation en potentiel vectoriel magnétique. La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à l'utilisation de la MEF adoptée, ainsi qu'à la présentation des deux machines étudiées et la description du logiciel de calcul utilisé (F.E.M.M).

Au dernier chapitre on va présenter et exploiter les résultats de la simulation numérique effectuée sur des deux types machines MSAP insérés et déposés en surface.

Chapitre 3

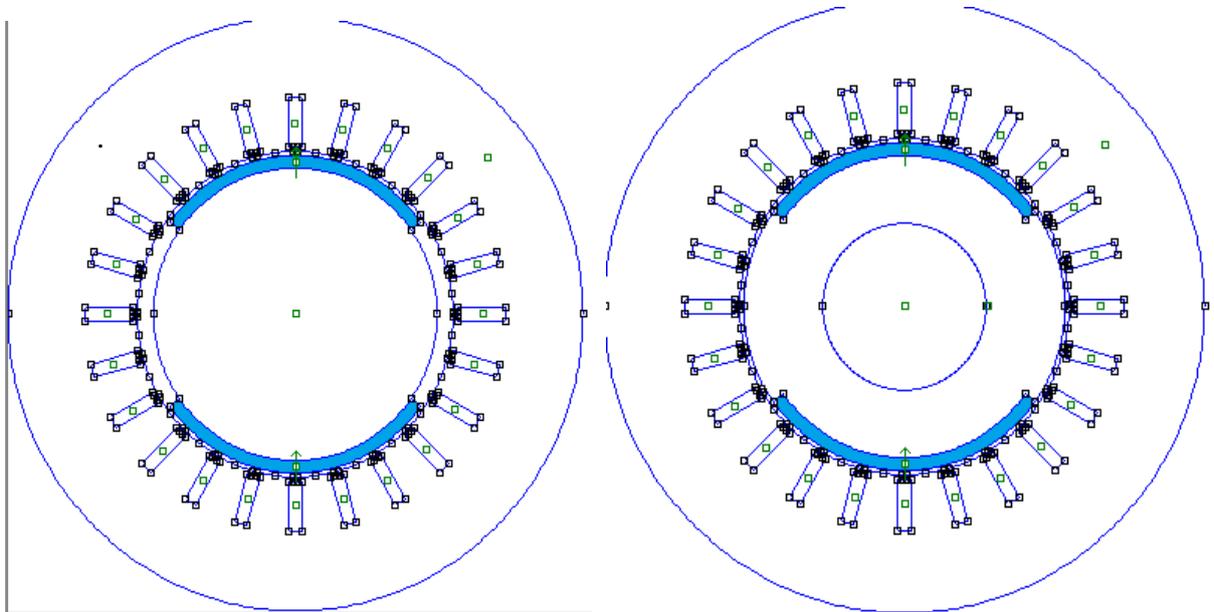
Détermination et analyse des caractéristiques de la MSAP

Chapitre 3

Détermination et analyse des caractéristiques de la MSAP**III.1 introduction**

Le fonctionnement des machines électriques est directement lié à la distribution des lignes de champs magnétiques au sein de leur structure. La connaissance de cette distribution permet de déterminer les grandeurs nécessaires à leur dimensionnement ou l'évaluation de leurs performances comme le flux, le couple électromagnétique,...etc.

Dans ce dernier chapitre nous allons commencer par présenter les machines d'études que sont la MSAP en surface et la MSAP insérés, en vue de les comparer, puis en première partie nous allons, en utilisant le logiciel FEMM, effectuer plusieurs simulations dont la première consiste à déterminer le flux engendré dans l'entrefer de ces machines par les différents aimants (Alnico8, SMCO, NdFeB58). Notre deuxième partie consiste à relever les caractéristiques magnétiques des machines étudiées et l'étude de l'influence des paramètres géométriques des aimants en présence sur les performances de ces machines.



a) MS à AP déposés en surface

b) MS à AP insérés

Figure I Figure III-1 architecture des machines étudiées

III.2 Présentation des deux machines étudiées

Nos deux machines d'étude sont synchrones à aimant permanent triphasé à flux radial, à rotor interne. La première porte des aimants permanents déposés en surface (Figure III-1 (a)) et dans la deuxième les aimants permanents sont insérés dans le rotor (Figure III-1(b)) possédant chacune :

- deux pôles : $2p=2$
- Un stator cylindrique en tôles ferromagnétiques à 24 encoches rectangulaire, comportant un enroulement triphasé à simple couche.
- Un rotor lisse en matériau ferromagnétique sur lequel sont collés deux aimants, présentant une aimantation radiale.
- angle d'ouverture des aimants 108° .

Les caractéristiques géométriques et électriques des deux machines sont résumées dans le tableau (III.1)

III.2.1 Caractéristiques géométriques

Symbole	valeur	Désignation
R_{Sint}	39.385mm	rayon intérieur du stator
R_{Sext}	71.75 mm	rayon extérieur du stator
R_r	35.385 mm	rayon du rotor
R_{arb1}	16.52 mm	rayon de l'arbre surface
R_{arb2}	19.52 mm	rayon de l'arbre inséré
h	3 mm	épaisseur de l'aimant
R_{aim1} (surface)	38.385 mm	rayon des aimants surfaciques
R_{aim2} (inséré)	32.385 mm	rayon des aimants insérés
N	9	nombre de spire par bobine
α	15°	angle entre les encoches statorique
E	220	tension d'alimentation
Freq	50	fréquence
Z	24	nombre d'encoche

Tableau III.1 : Grandeurs caractéristiques des machines étudiées.

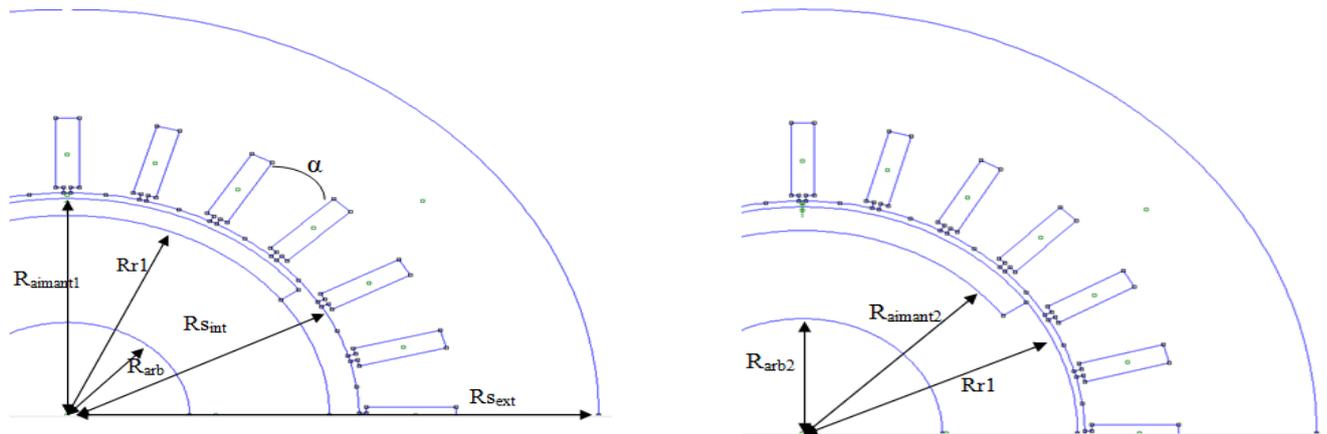
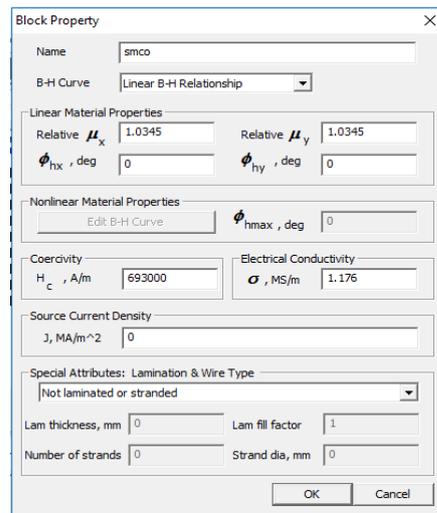
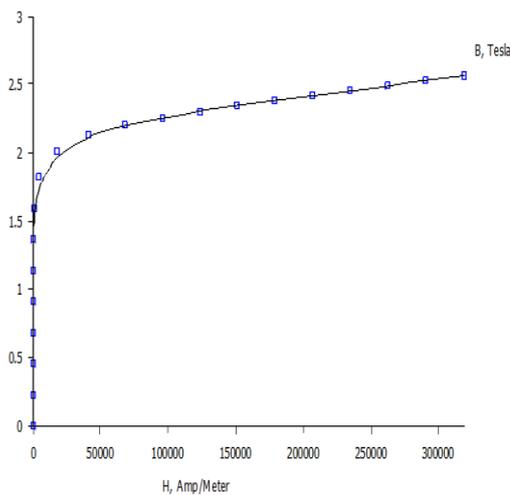


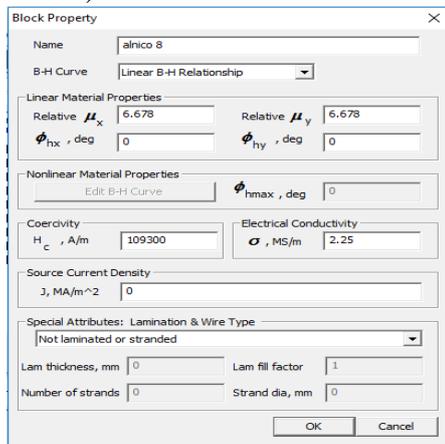
Figure III-2 Caractéristiques géométriques des machines étudiées

III.2.2 Matériaux utilisés

Les caractéristiques des matériaux utilisés sont obtenues directement à partir de la bibliothèque des matériaux du logiciel FEMM

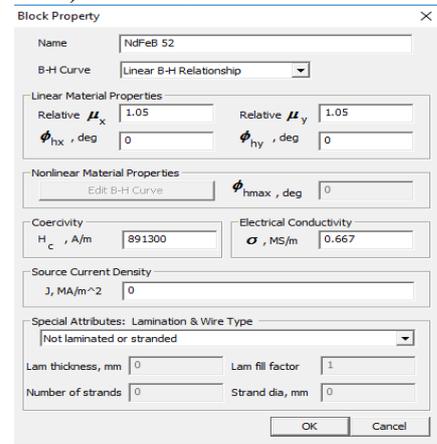


A) Pure-Iron



C) Aimant Alnico 8

B) Aimant SmCo



D) Aimant NdFeB

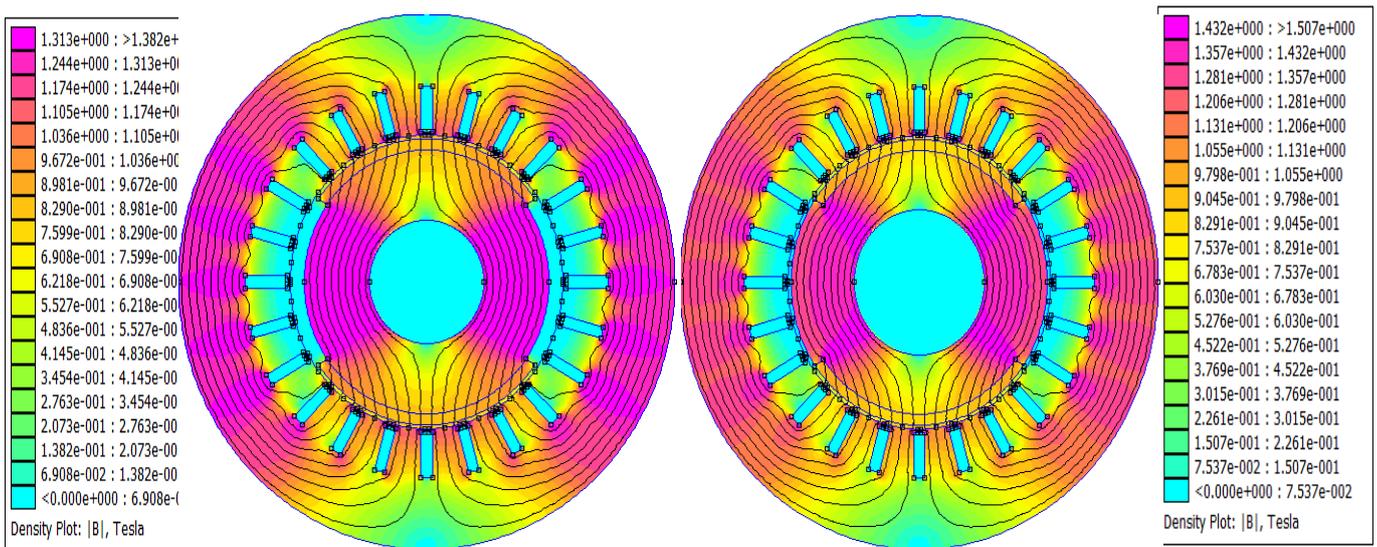
Figure III-3 propriétés magnétiques des matériaux utilisés

	Matériaux utilisés
Stator	Pure-Iron
Rotor	Pure-Iron
Arbre	Acier
Aimants permanents	Alnico 8
	SMCO
	NdFeB 52
Entrefer	Air ou vide
bobinage	cuivre

Tableau III.2 Matériaux utilisés

III.2.3 Répartition de l'induction magnétique créée par les aimants permanents seuls

On annule les courants statoriques et on visualise la répartition de l'induction magnétique créée par les aimants seuls



a) aimants déposés en surface

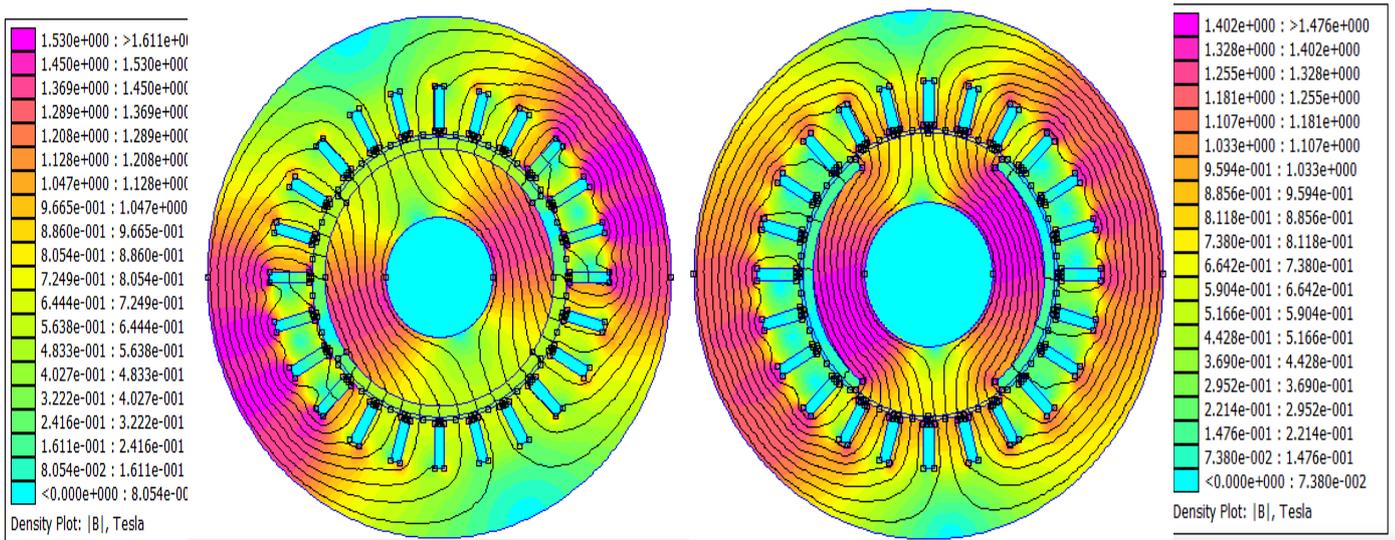
b) aimants insérés

Figure III-2 Répartition de l'induction magnétique créée par les aimants permanents seuls

Les deux figures montrent que pour une même configuration géométrique des deux machines et particulièrement des aimants en présence, le flux magnétique engendrés par la MSAP à insérés et plus important que celui engendrée dans la MSAP déposés en surface. La réluctance du circuit magnétique a été modifiée et il y a plus d'air (d'entrefer) dans la machine à aimants déposés et par conséquent plus de réluctance, donc moins de flux. $NI=R.\Phi$

III.2.4 Répartition de l'induction magnétique créée par les bobines seules

On remplace les aimants par de l'air, vu que leur perméabilité est proche de ce dernier, et on visualise la répartition de l'induction magnétique créée par les bobines seules pour les deux structures en alimentant la phase 1 seule (Figure III-4).



c) Aimants déposés en surface (100A)

b) Aimants insérés (35A)

Figure III-3 Répartition de l'induction magnétique créée par les bobines seules

Cette façon de faire nous permettra par la suite de relever les inductances propres et mutuelles des deux machines

Les figures montrent des zones saturées et non saturées dans les circuits magnétiques des deux machines. La MSAP à aimants insérés a des dispositions à la saturation vu la faible réluctance de son circuit magnétique.

III.3 Caractéristiques statiques de la MS à aimants permanents

A vide, les seules sources d'excitation sont les aimants permanents, Les trois figures suivantes montrent le trajet principal du flux d'une paire de pôles en tenant compte de la symétrie des lignes du flux et de la périodicité de la structure.

III.3.1 machine synchrone à aimant déposé en surface

Les flux magnétiques par phase du aux différents aimants déposés en surface (SmCo, NdFeB, alnico8) ont été déterminés par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FEMM :

a) Flux magnétique d à l'aimant SmCo

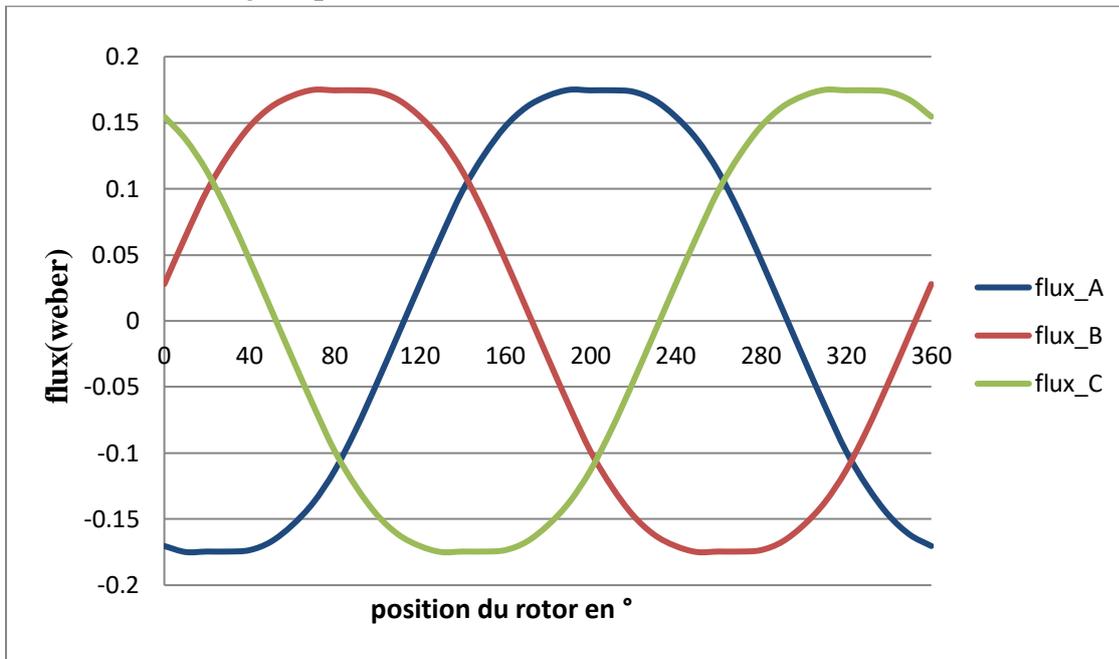
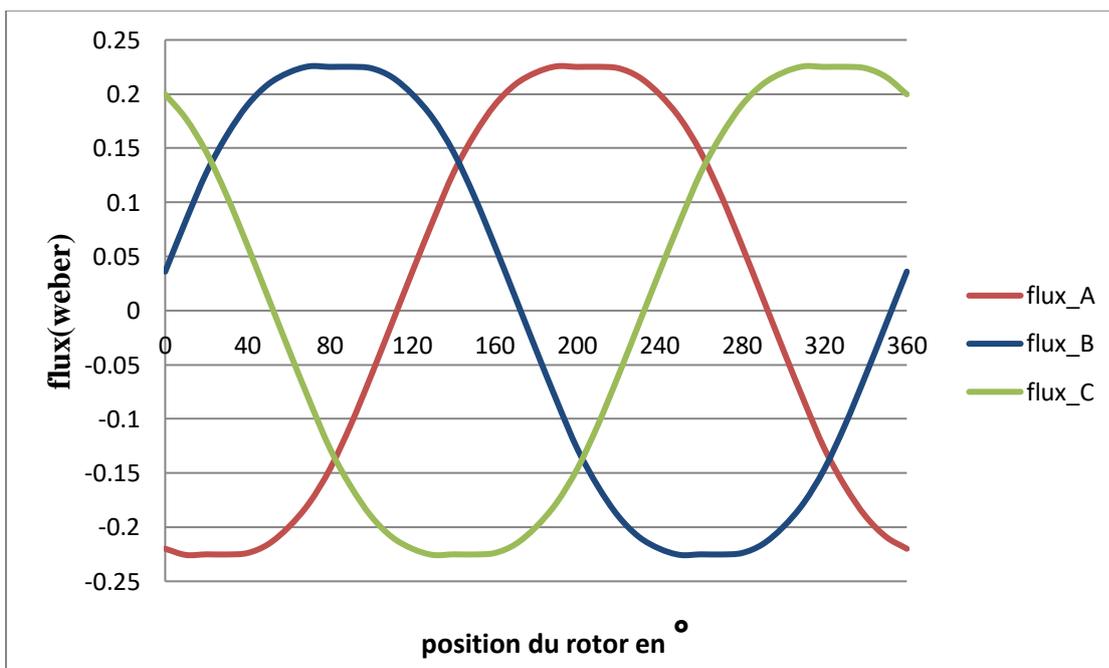


Figure III-6 Flux /phase de MSAP avec des aimant SmCo

b) Flux magnétique du à l'aimant NdFeB :



FigureIII-7 Flux /phase de MSAP avec des aimant NdFeB

c) Flux magnétique du à l'aimant Alnico 8

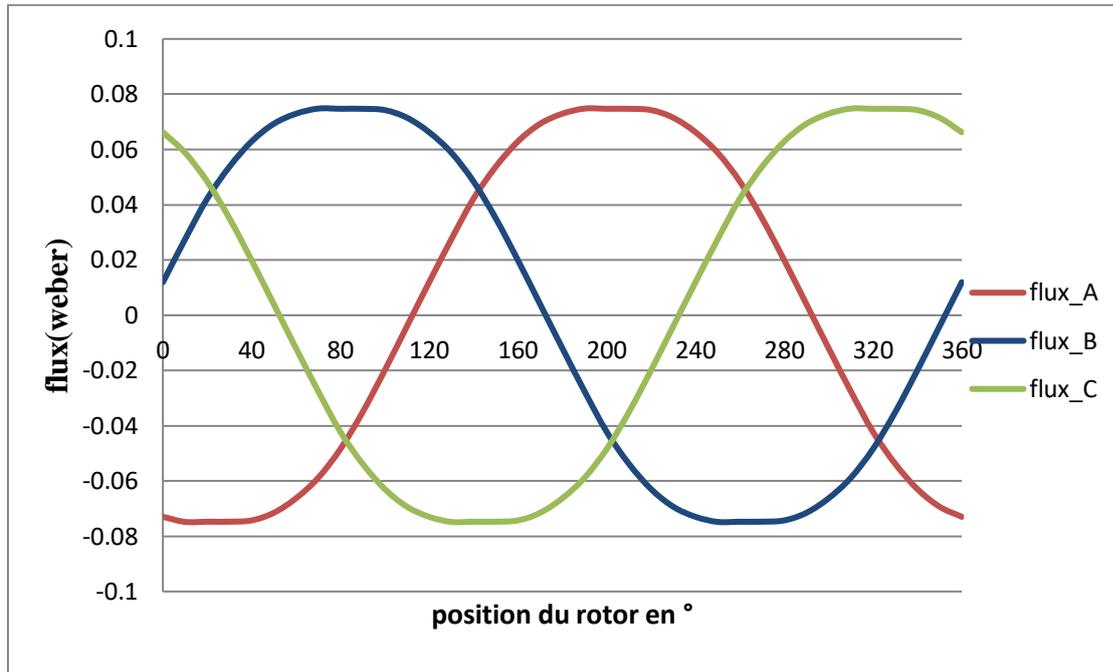


Figure III-8 Flux /phase de MSAP avec des aimants Alnico8

Les figures précédentes montrent que les flux magnétiques engendrés par les aimants en présence dans les trois phases de la machines, sont déphasés de $2\pi/3$ et présentent des allures proches de la sinusoïde. Les FEMs engendrées seront-elles aussi proches de la sinusoïde.

La différence réside dans les amplitudes des inductions magnétiques engendrées. Il est évident, d'après les figures, que pour un même volume d'aimants, les aimants de type Néodyme Fer-bore produisent plus d'induction, donc plus de flux magnétique que les autres types d'aimants. Alnico et SmCo.

II.3.2 machine synchrone à aimants insérés

Pour un même volume d'aimants, les flux des différents aimants insérés (SmCo, NdFeB, Alnico8), engendrés dans chacune des trois phases, constituant le bobinage de la machine, ont été déterminés par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FEMM et se présentent comme suit :

a) Flux magnétique dû à l'aimant SmCo

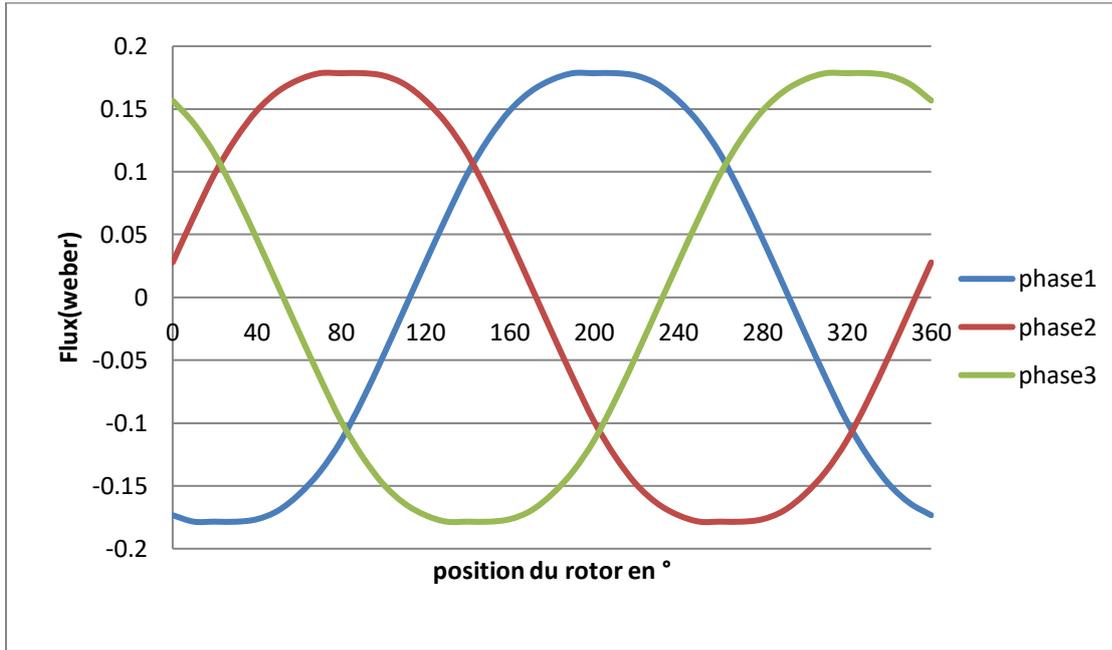


Figure III-9 Flux /phase de MSAP avec des aimants SmCo

b) Flux magnétique dû à l'aimant NdFeB

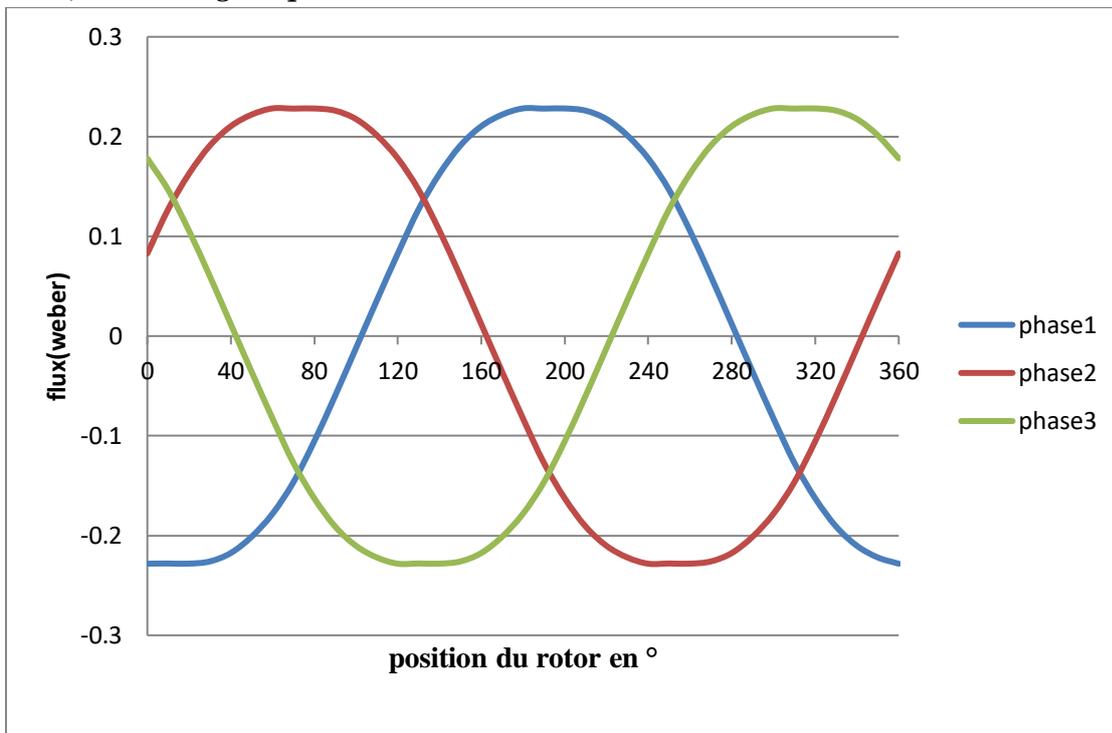


Figure III-10 Flux /phase de MSAP avec des aimants NdFeB

c) Flux magnétique dû à l'aimant Alnico 8

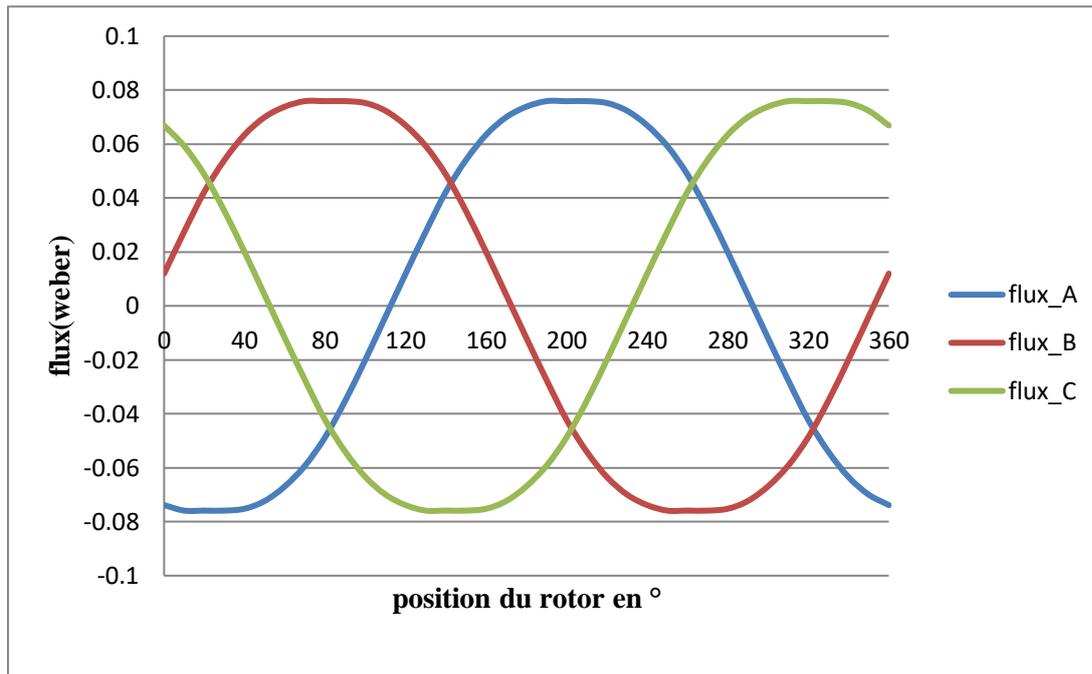


Figure III-11 Flux /phase de MSAP avec des aimants Alnico8

II.3.3 Récapitulatif

a) Résultats des flux max avec aimants déposés en surface :

Aimant	SmCo	NdFeB 58	Alnico 8
Flux max (weber)	0.174924093	0,2256484189	0,0748011331

Tableau III.3 : les flux max

b) Résultats des flux max avec aimants insérés :

Aimants	SmCo	NdFeB	Alnico 8
Flux max	0.178466117	0.228010742	0.075877903

Tableau III.4 : les flux max

Comme attendu, compte tenu de la réluctance du circuit magnétique vue des aimants, le flux max dans le cas de la MSAP à aimants insérés est plus grand et ce quelque-soit le type d'aimant utilisé.

Dans cette partie du mémoire nous avons présenté les flux des trois aimants (Samarium cobalt, Neodyme-Fer-Bore 58, Alnico8) afin de mener une première comparaison entre ses aimants et ses structures vis-à-vis de leur flux. Le résultat de cette simulation nous montre que les MS à aimants insérés sont un peu plus performantes que de celles à AP en surface et nous montre aussi que l'aimant Neodyme-Fer-Bore semble être le meilleur candidat.

III.4 Induction magnétique due aux aimants permanents

L'induction et le champ magnétique engendrés par les différents aimants utilisés (SmCo, NdFeB, Alnico8) ont été déterminés par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FEMM :

Les figures suivantes montrent les formes d'ondes de la composante normale de l'induction magnétique B_n et de la composante tangentielle du champ magnétique engendrés, par les 3 types d'aimants en présence, dans l'entrefer de la MSAP déposés en surface et des MSAP insérés

III.4.1 Caractéristiques magnétiques dues aux aimants permanents déposés en surface

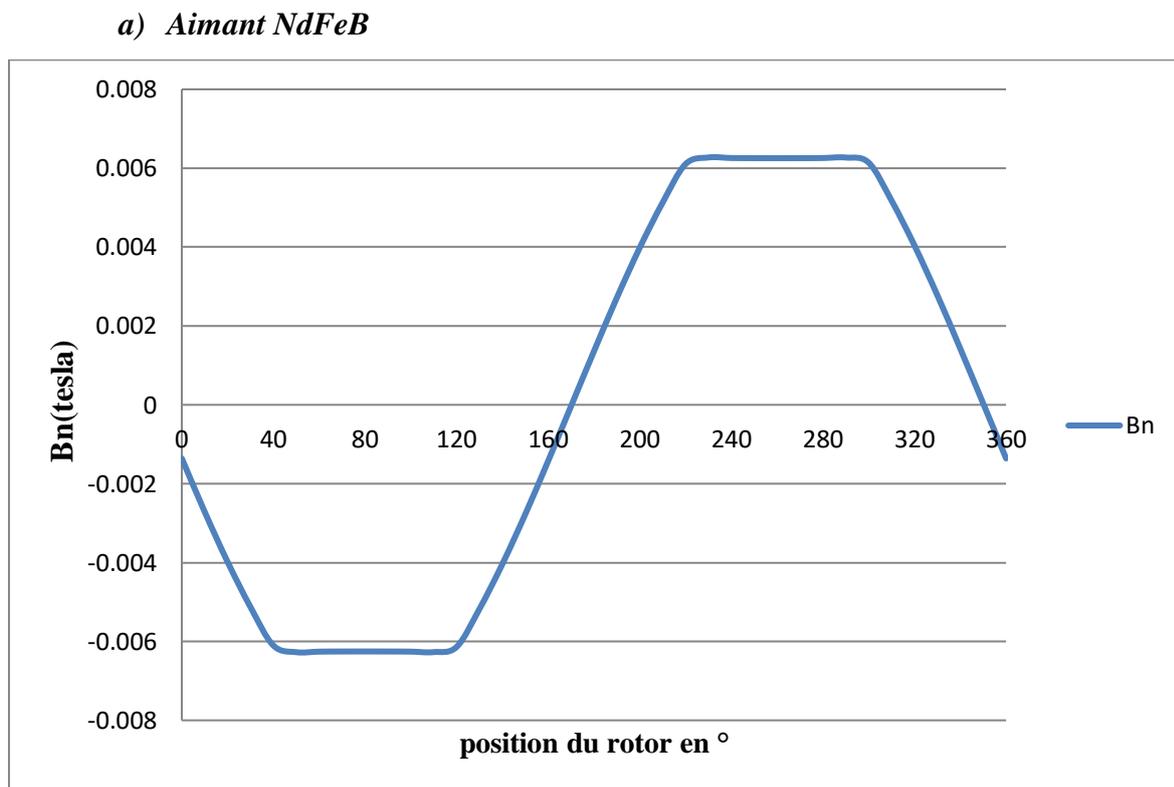


Figure III-12 L'induction magnétique B_n dans l'entrefer

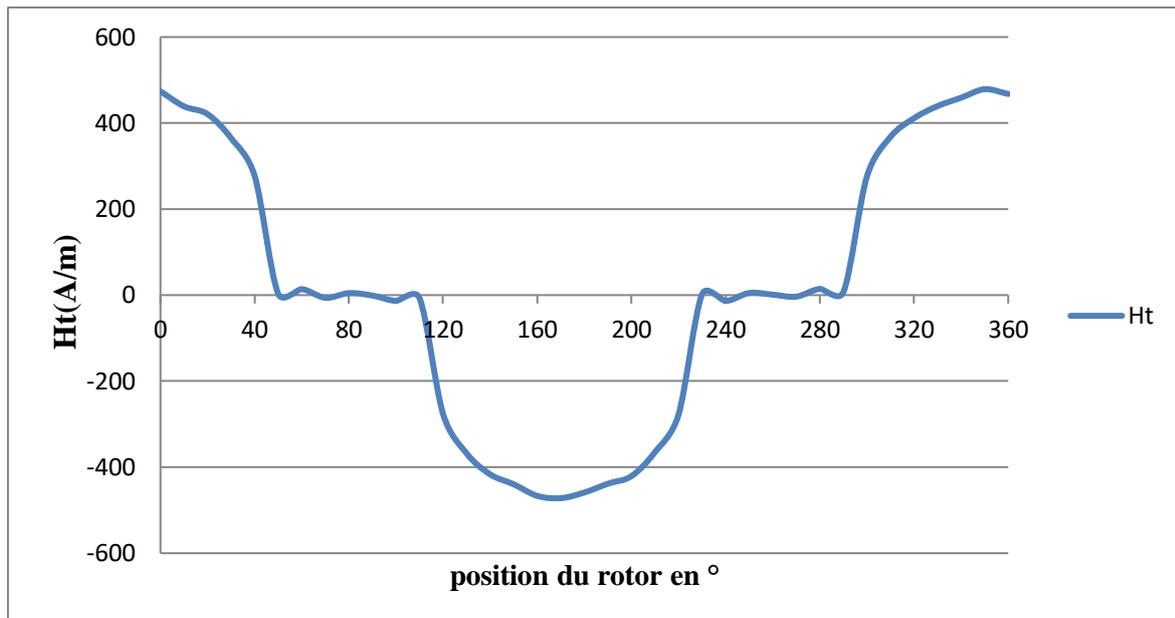


Figure III-13 Le champ magnétique H_t

b) Aimant SmCo

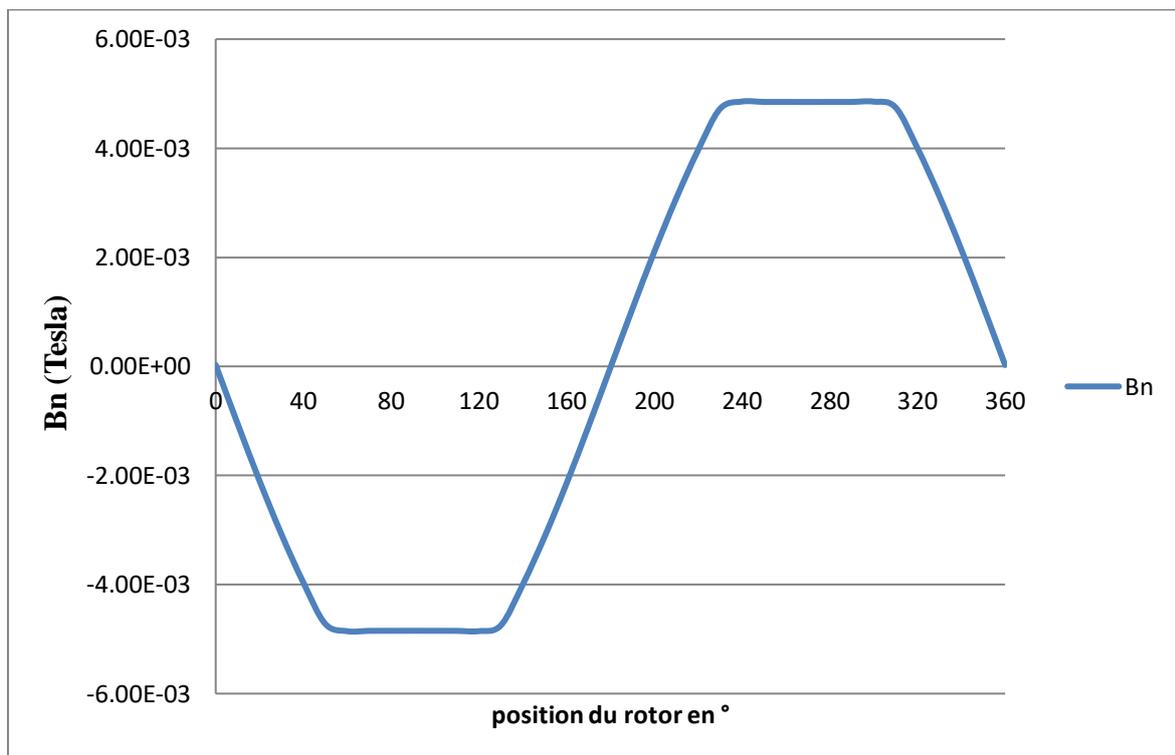


Figure III-14 L'induction magnétique B_n

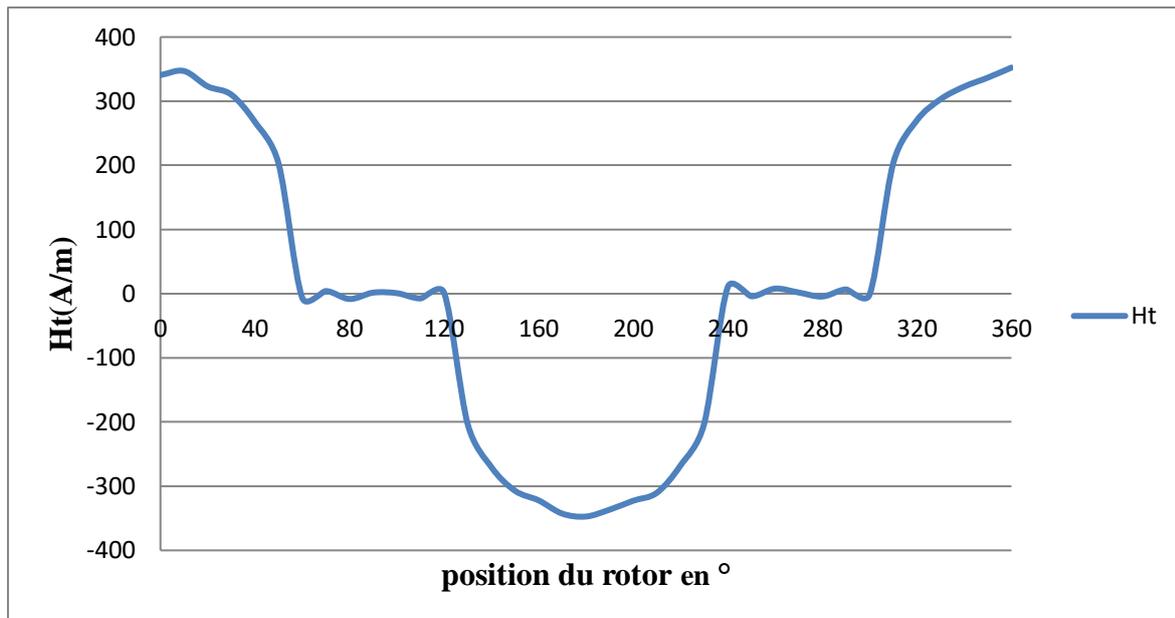


Figure III-15 Le champ magnétique H_t

c) Aimant alnico 8

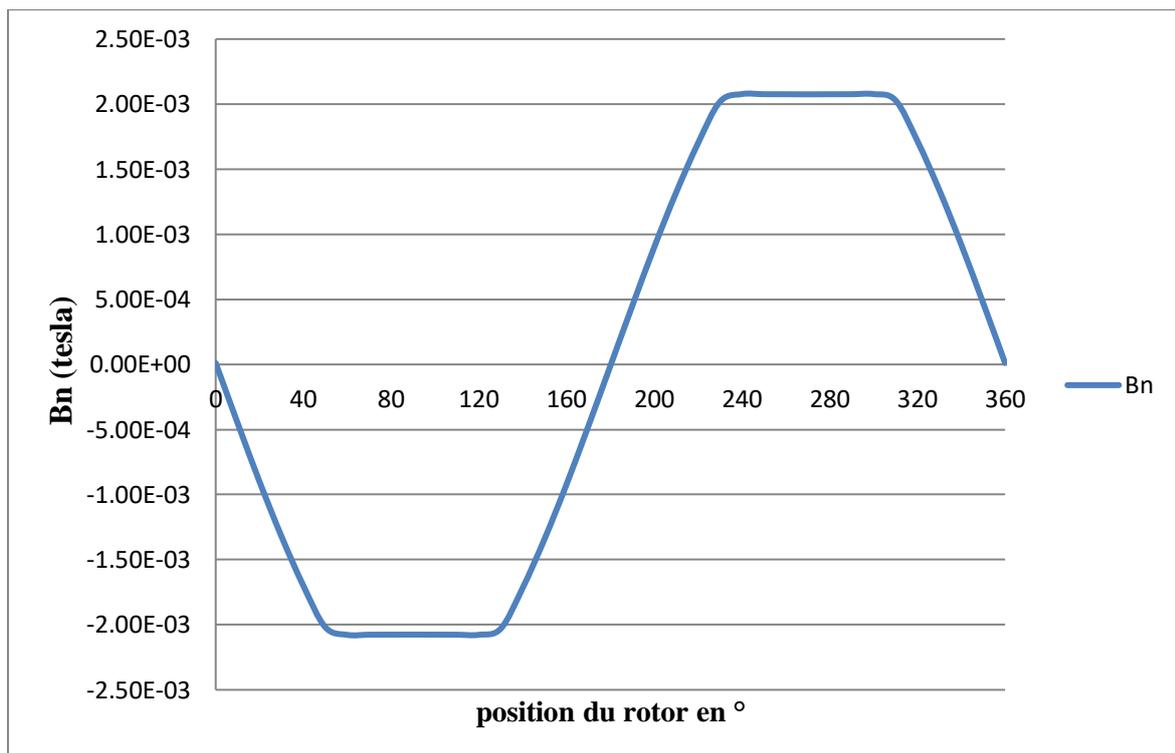


Figure III-16 L'induction magnétique B_n

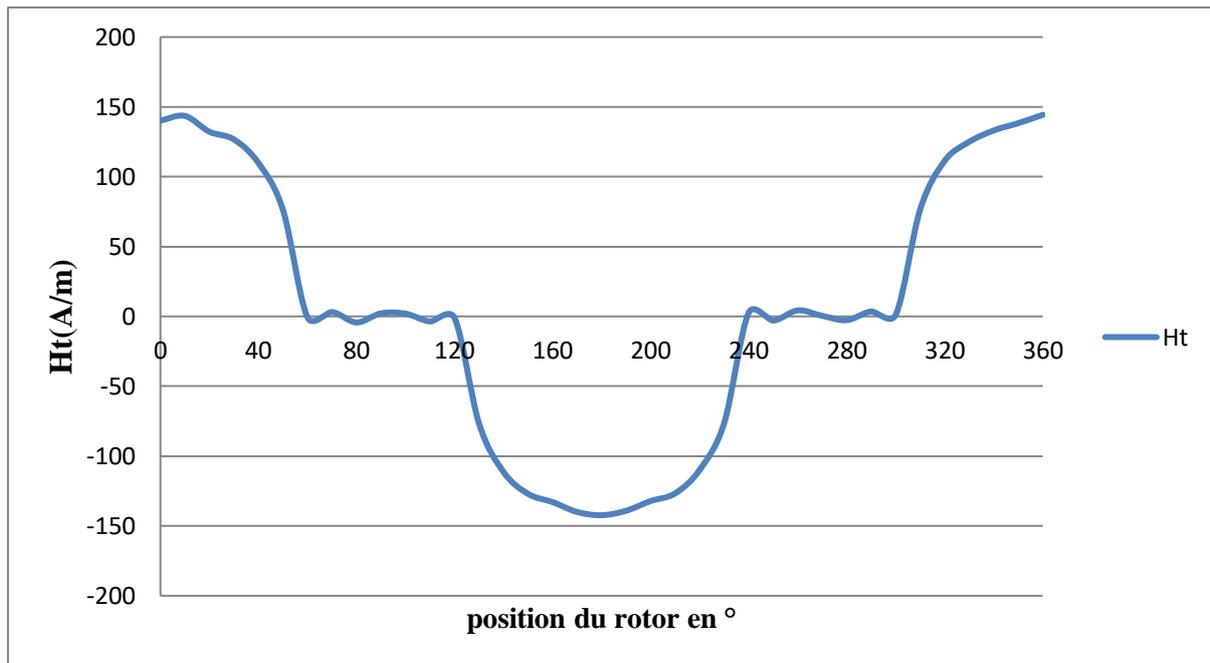


Figure III-17 Champ magnétique H_t

III.4.2 Caractéristiques magnétiques dues aux aimants permanents insérés

a) Aimant NdFeB

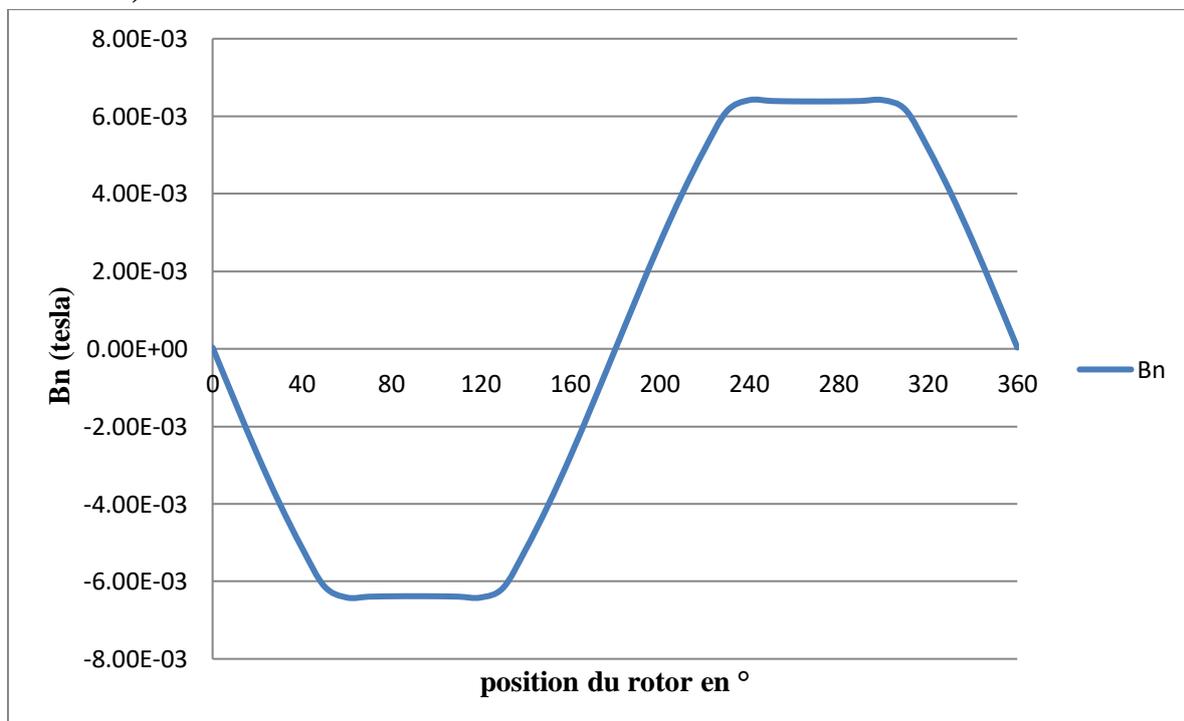


Figure III-18 L'induction magnétique B_n

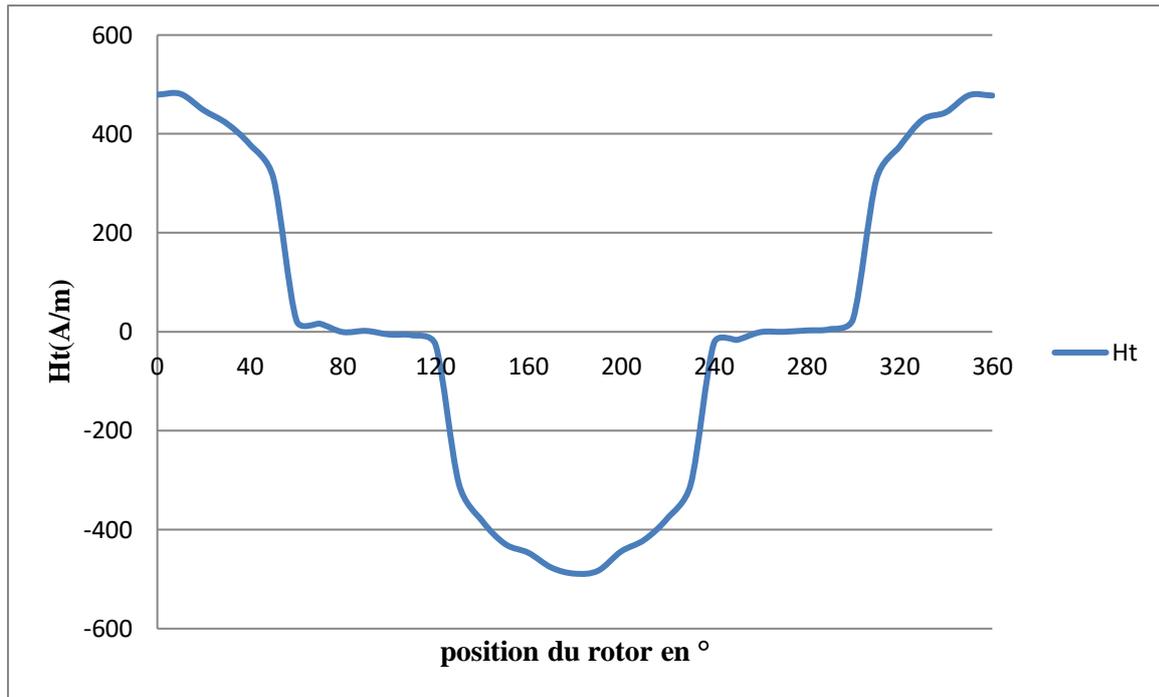


Figure III-19 Champ magnétique H_t

b) Aimant SmCo

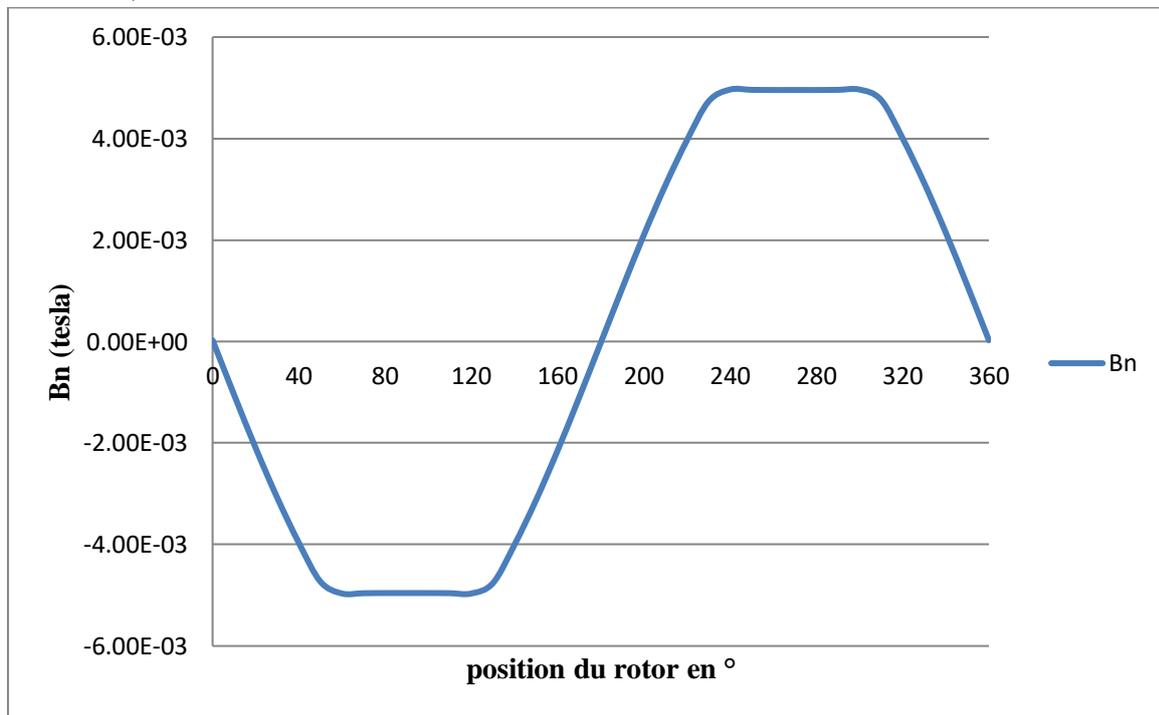


Figure III-20 L'induction magnétique B_n

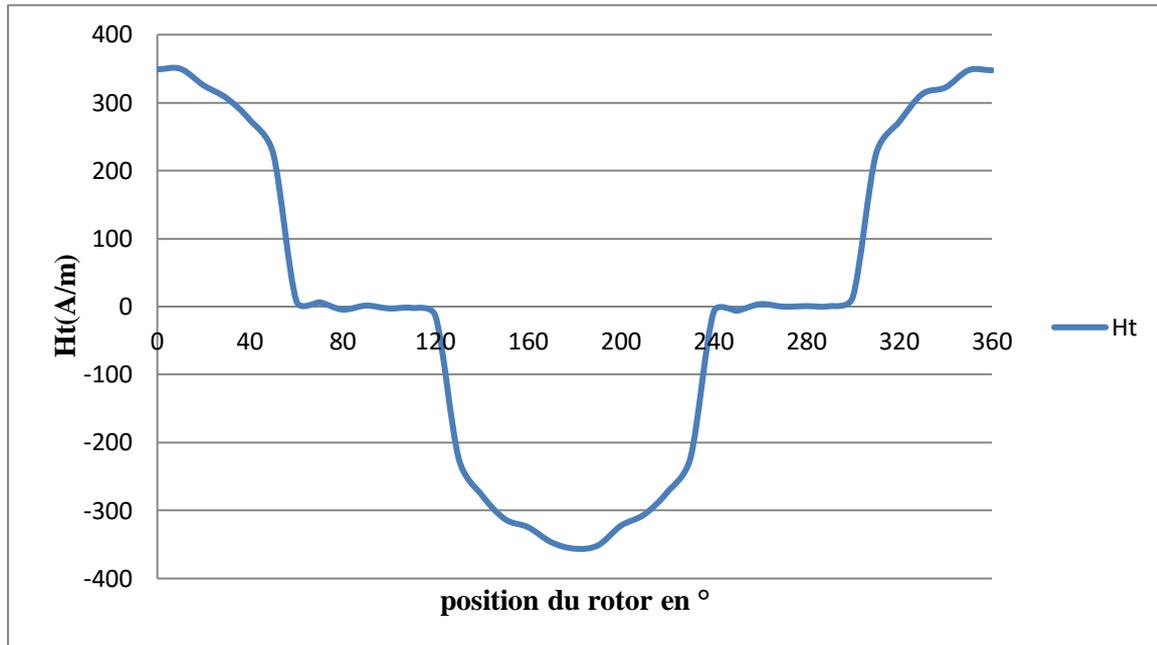


Figure III-21 Champ magnétique H_t

c) *Aimant alnico 8*

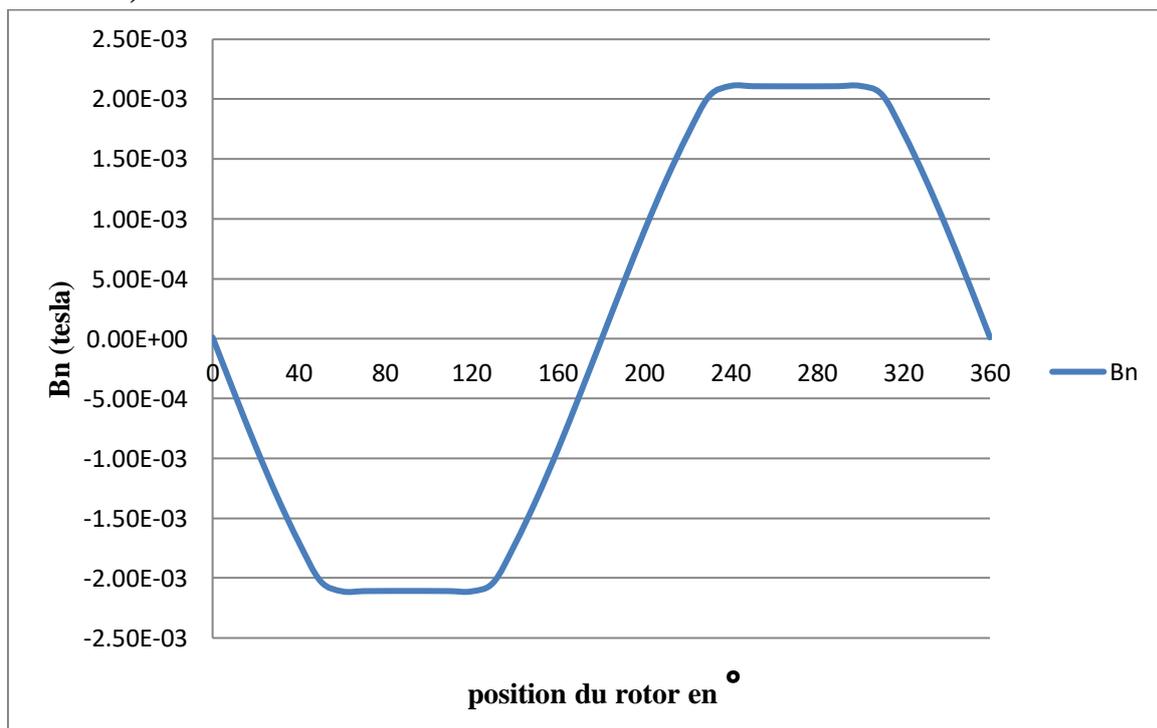


Figure III-22 L'induction magnétique B_n

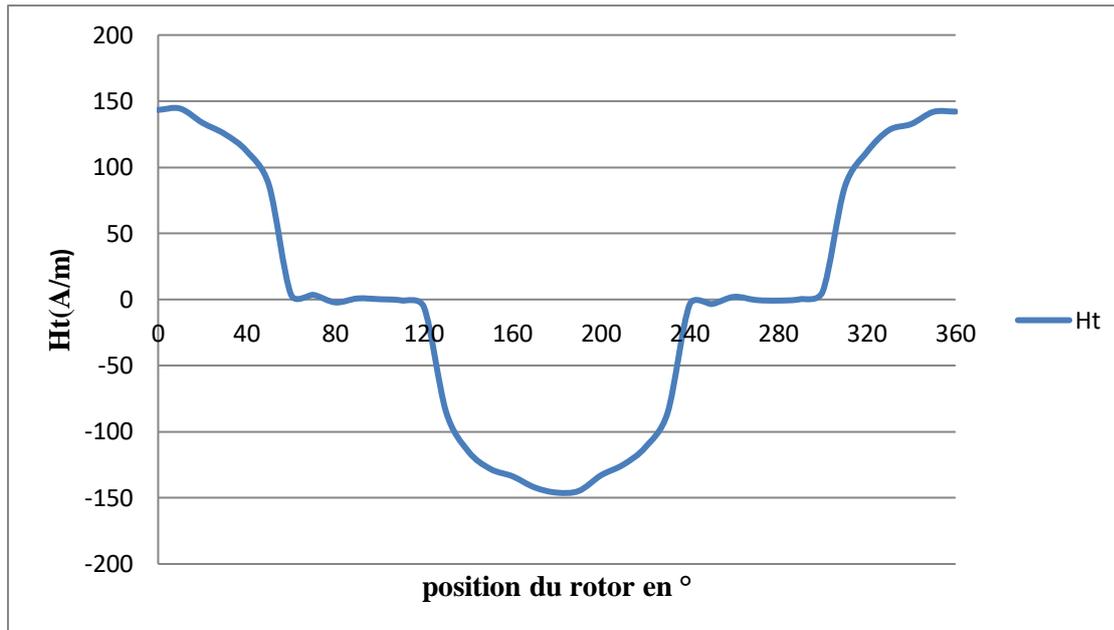


Figure III-23 Champ magnétique Ht

III.4.3 Récapitulatif

a) Aimants déposés en surface

Aimants	NdFeB	SmCo	Alnico
Bn	0.006254478	0.00485	0.000208
Ht	478.7207501	346.9989008	144.3206158

Tableau III.5 caractéristiques magnétiques des aimants déposés en surface

b) Aimants insérés

Aimants	NdFeB	SmCo	Alnico
Bn	0.00638	0.00496	0.00211
Ht	478.29	347.7596249	141.8784356

Tableau III.6 caractéristiques magnétiques des aimants insérés

D'après cette simulation on a constaté que le neodyme-fer-bore est l'aimant qui a les meilleures caractéristiques magnétiques pour les deux structures

Les composantes normales de l'induction magnétique présentent des allures trapézoïdales alors que celles des composantes tangentielles qui représentent la FMM équivalente des aimants en présence sont d'allure qui se rapprocherait de la sinusoïde.

III.5 inductances et inductances mutuelles des deux machines

Le calcul de l'inductance de chaque phase a été obtenu en remplaçant les aimants par un matériau magnétique de perméabilité μ_a (la perméabilité de l'air) et en alimentant la phase considérée par un courant continu i

$$L(\theta, i) = \frac{\Psi(\theta, i)}{i} \quad (\text{III.1})$$

On a choisit le NdFeB pour ses meilleurs caractéristiques

III.5.1 MS à Aimants déposés en surface

Pour ce type de machine, la réluctance du circuit magnétique est invariable quelque soit la position du rotor. L'inductance ne pourrait varier qu'en faisant varier le courant alimentant la phase considérée.

L'allure des inductances et des inductances mutuelles sont obtenues en fixant la position du rotor (pole lisse) pour les différentes valeurs du courant de phase I1, elles sont représentées dans les Figures (III-24) et (III-25) respectivement :

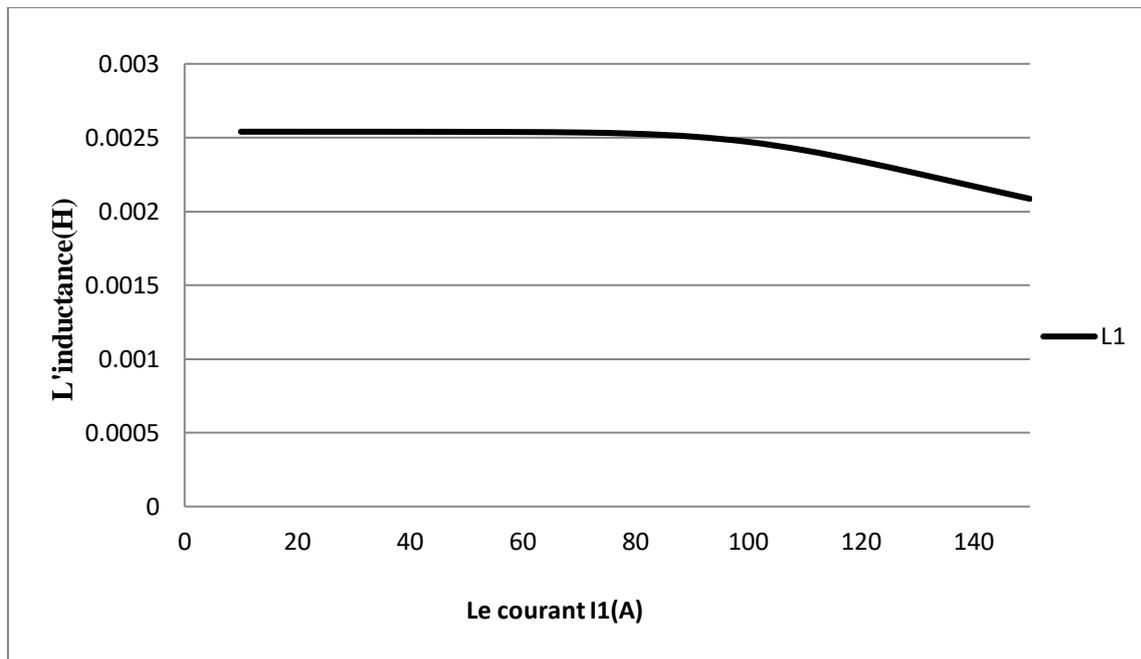


Figure III-24 Inductance d'une phase

L'inductance reste constante pour une valeur de 0.0025 H pour des faibles courants, puis diminue à partir de $I=100A$ pour des forts courants causant la saturation du circuit.

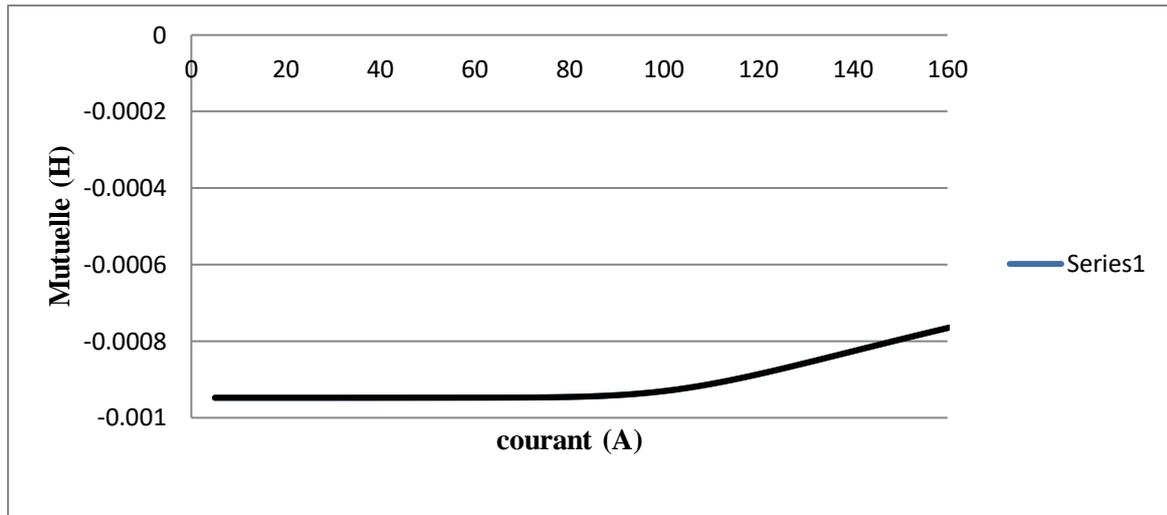


Figure III-25 inductance mutuelle

La mutuelle M_{12} , rapport du flux magnétique traversant la phase 2 quand on alimente la phase 1, par le courant électrique traversant cette dernière, reste constante pour une valeur absolue de 0.00095 H (pour des valeurs absolues) pour des faibles courants, puis diminue à partir de $I_n=100A$ pour des forts courants causant la saturation du circuit magnétique.

II.5.2 MS à Aimants insérés

L'allure de cette inductance est obtenue en fixant la position du rotor (pole saillant) pour différentes valeurs du courant de phase, elle est représentée dans la Figure (III.26)

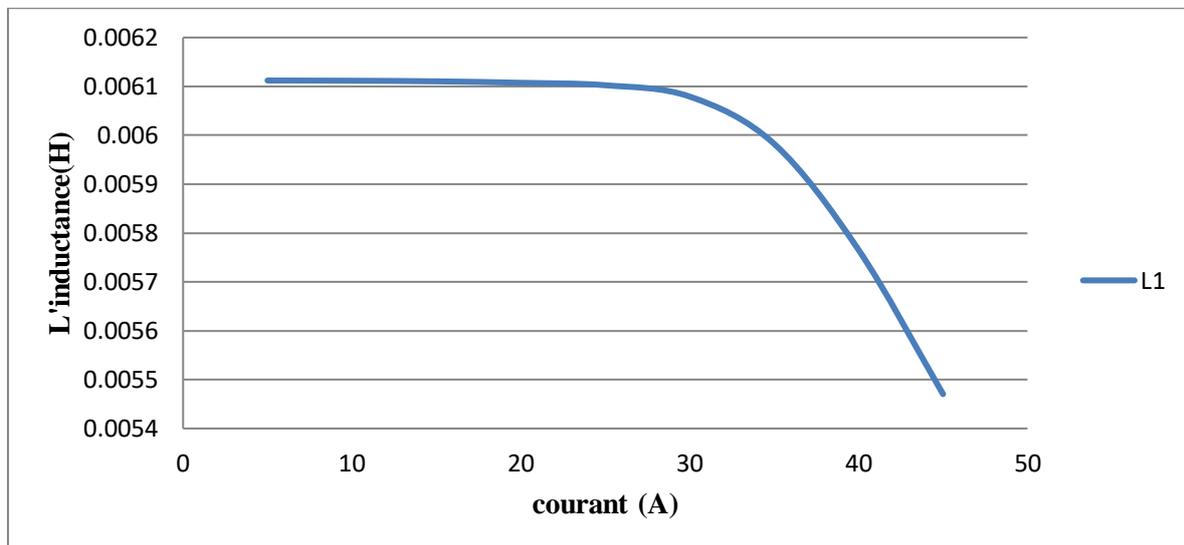


Figure III-26 Inductance statorique

L'inductance reste constante pour une valeur de 0.0061 H pour des faibles courants, puis diminue à partir de $I=35A$ pour des forts courants causant la saturation du circuit.

II.5.2.1 Cas Linéaire

A) Inductance

Pour le calcul des caractéristiques des inductances des trois phase on a effectué trois simulations en variant l'angle d'ouverture des aimants en fixant le courant $I=35A$, limite de la saturation.

1) Angle d'ouverture 108°

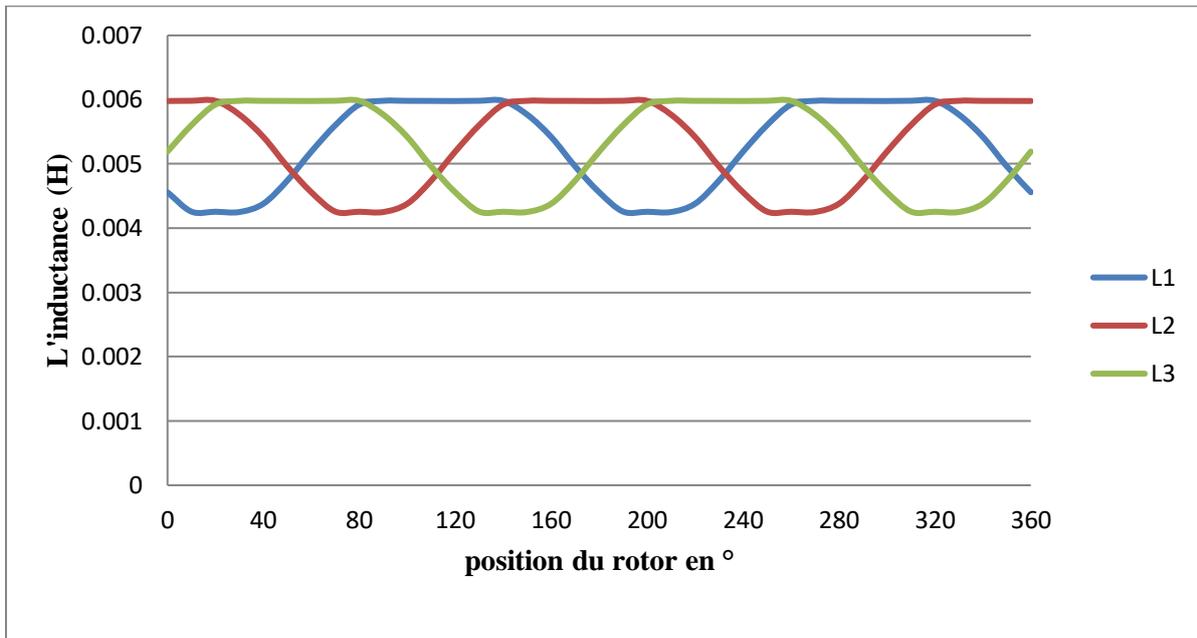


Figure III-27 Inductance propre

2) Angle d'ouverture 120°

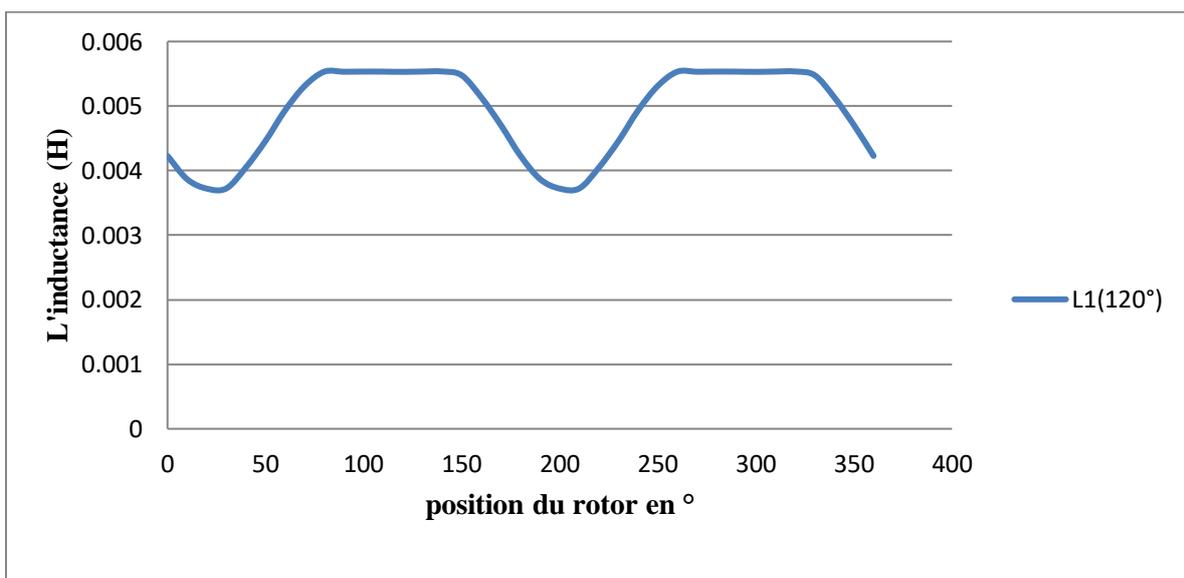


Figure III-28 Inductance propre

3) Angle d'ouverture 90°

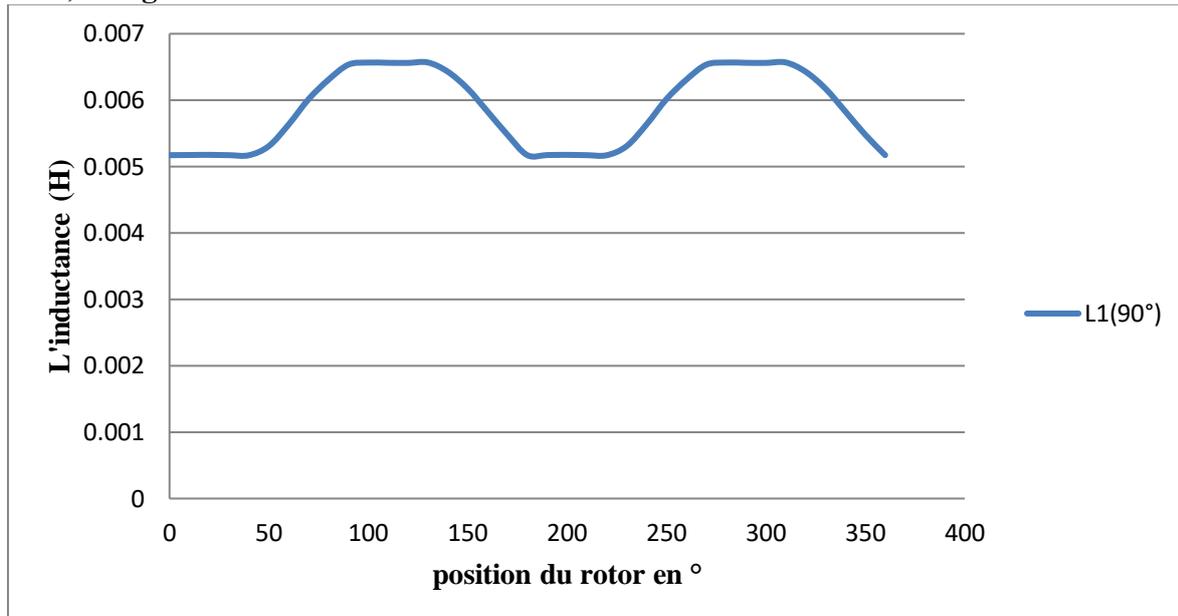


Figure III-29 Inductance propre

D'après cette simulation on constate les amplitudes et les formes d'onde des inductances propres varient en fonction de l'angle d'ouverture des aimants permanents.

B) Inductances mutuelles

Dans cette simulation on a fixé le courant nominal relevé dans la précédente simulation de la Figure (III-19) $I_n=35$ A et on a relevé les trois inductances mutuelles en fonction de la position du rotor.

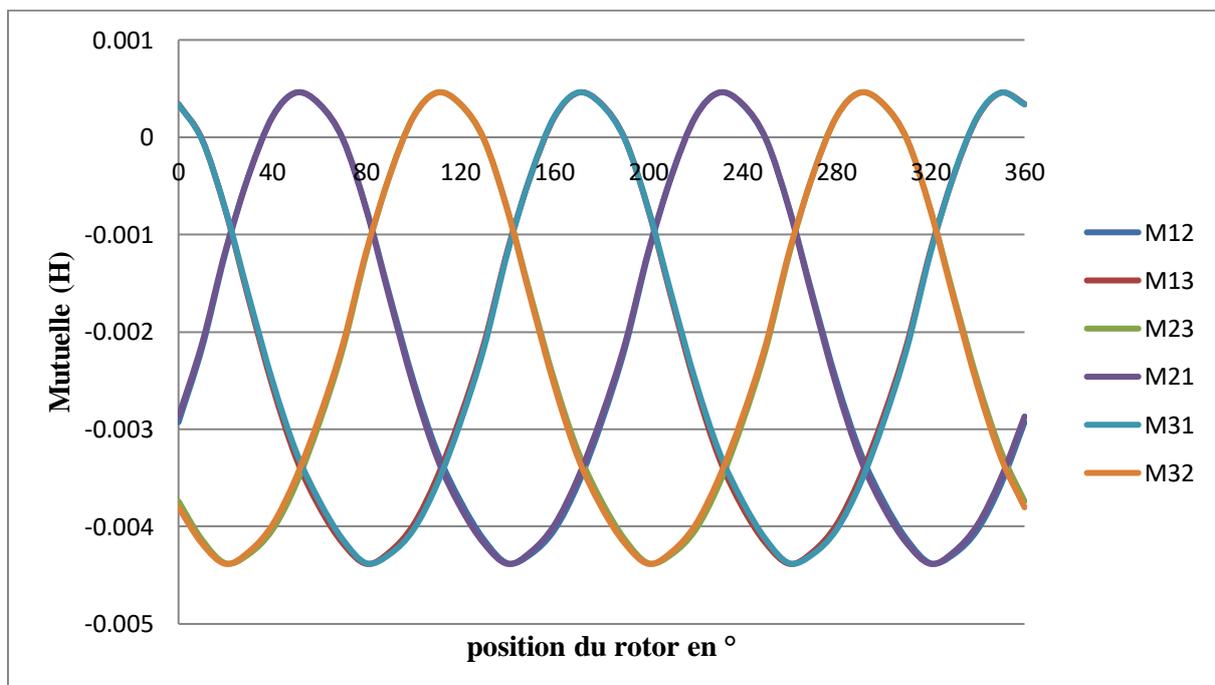


Figure III-30 Inductances mutuelles

On remarque que dans le cas linéaire les inductances mutuelles sont de forme sinusoïdale déphasé de $2\pi/3$ les unes par rapport aux autres et fait deux cycles sur un tour de rotor.

II.5.2.2 Non linéaire

Dans cette simulation on a fixé le courant $I=70$ A et on a relevé les caractéristiques des inductances propre et mutuelles en fonction de la position du rotor .

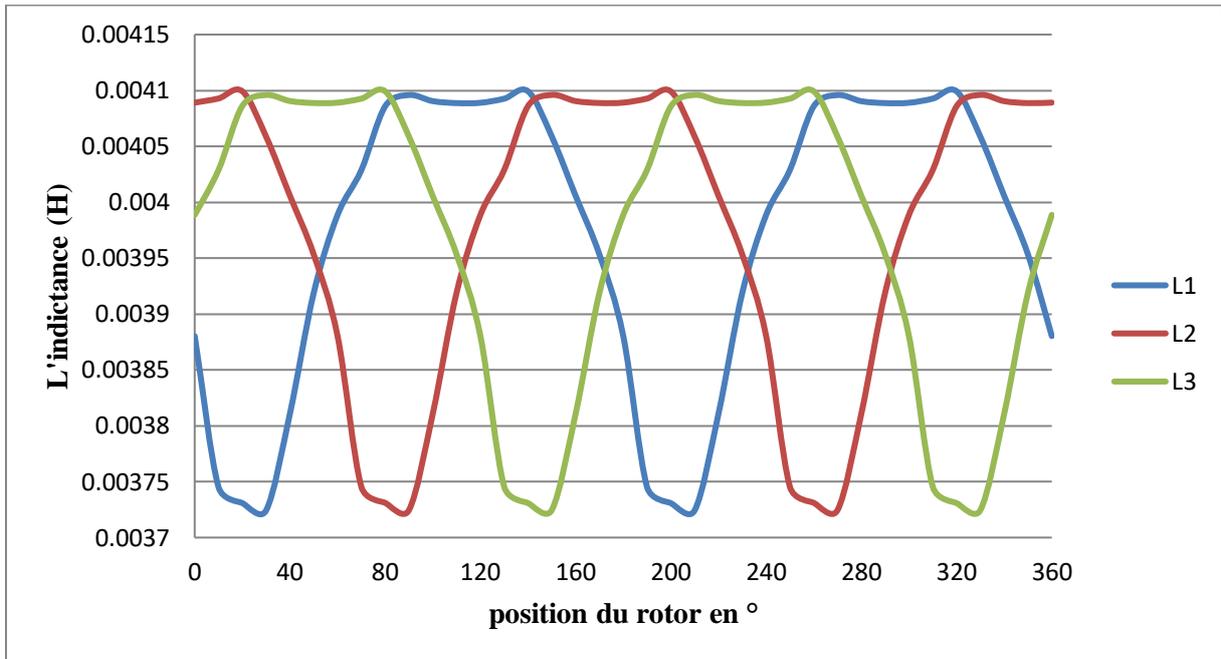


Figure III-31 Inductance propre

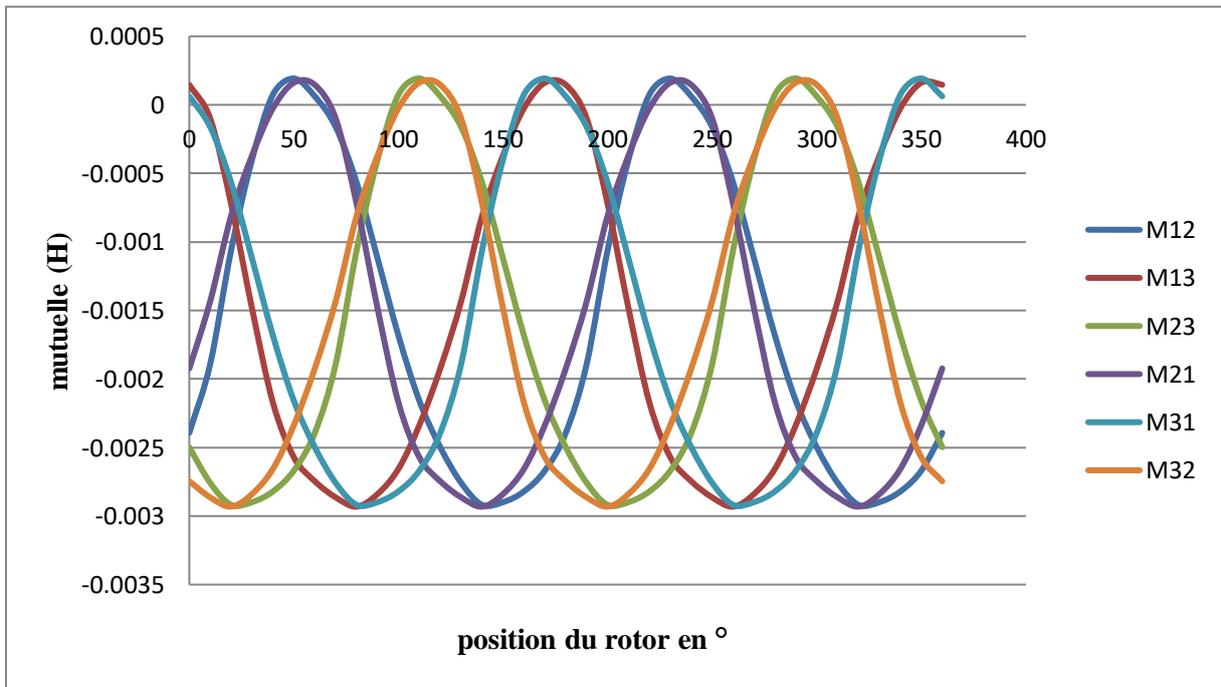


Figure III-32 Inductance Mutuelles

D'après cette simulation on constate que les allures des inductances propres et des inductances mutuelles sont déformées par la saturation du circuit magnétique. Les valeurs de l'inductance propres varient entre $L_{min}=0.0037h$ et $L_{max}=0.0041h$ et celles des inductances mutuelles varient entre $M_{min}= -0.003$ et $M_{max}= 0.0003$.

III.6 Influence de l'angle d'ouverture et de l'épaisseur de l'aimant sur les inductions magnétiques.

Dans les simulations suivantes on a fait tourner le rotor en variant les caractéristiques géométriques des aimants dans les deux machines en utilisant l'aimant NdFeB et on a calculé la composante normale de l'induction magnétique pour chaque cas :

II.6.1 MS a aimant déposé en surface

a) Angle d'ouverture des aimants

La Figure (III-33) nous montre la variation de l'induction magnétique en fonction de la position du rotor en agissant sur l'angle d'ouverture des aimants

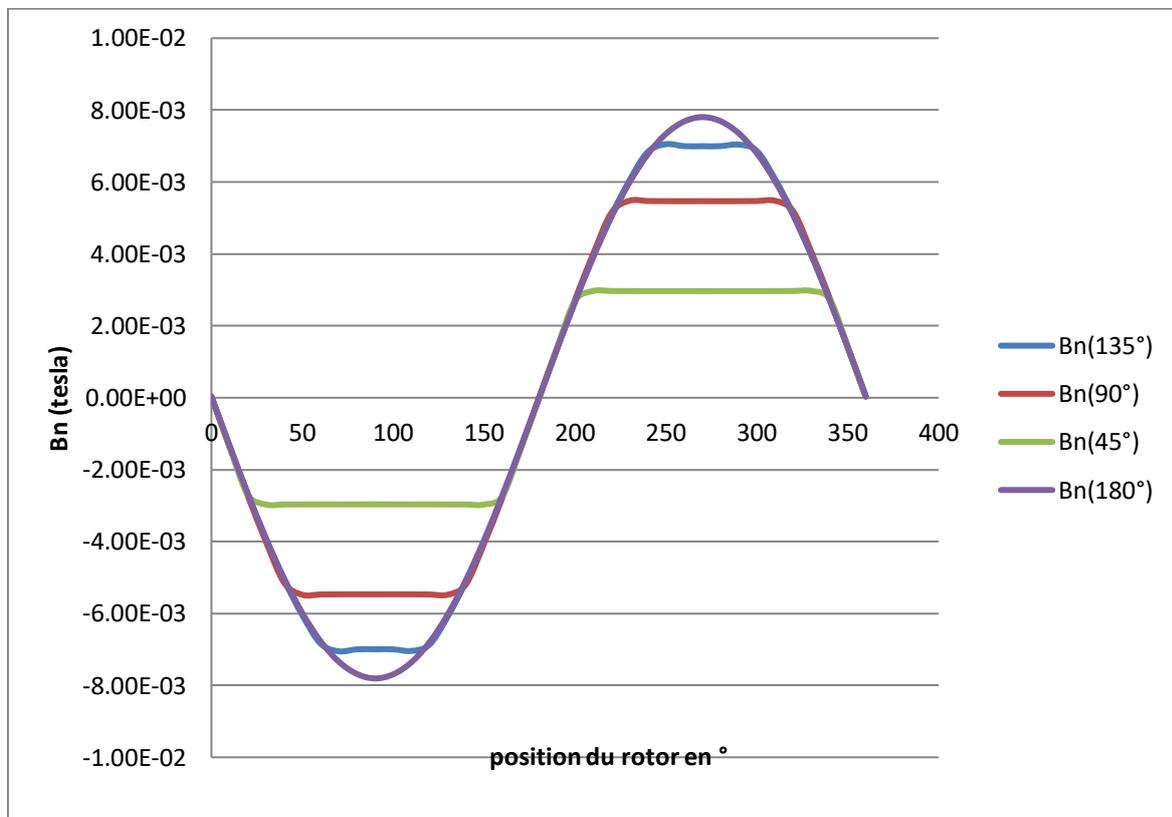


Figure III-33 Induction magnétique B_n

b) Epaisseur des aimants

Dans la Figure (III-34) on a fait varier l'épaisseur des aimants, en maintenant constant l'angle d'ouverture de l'aimant, pour calculer l'induction magnétique en fonction de la position du rotor en ($^{\circ}$)

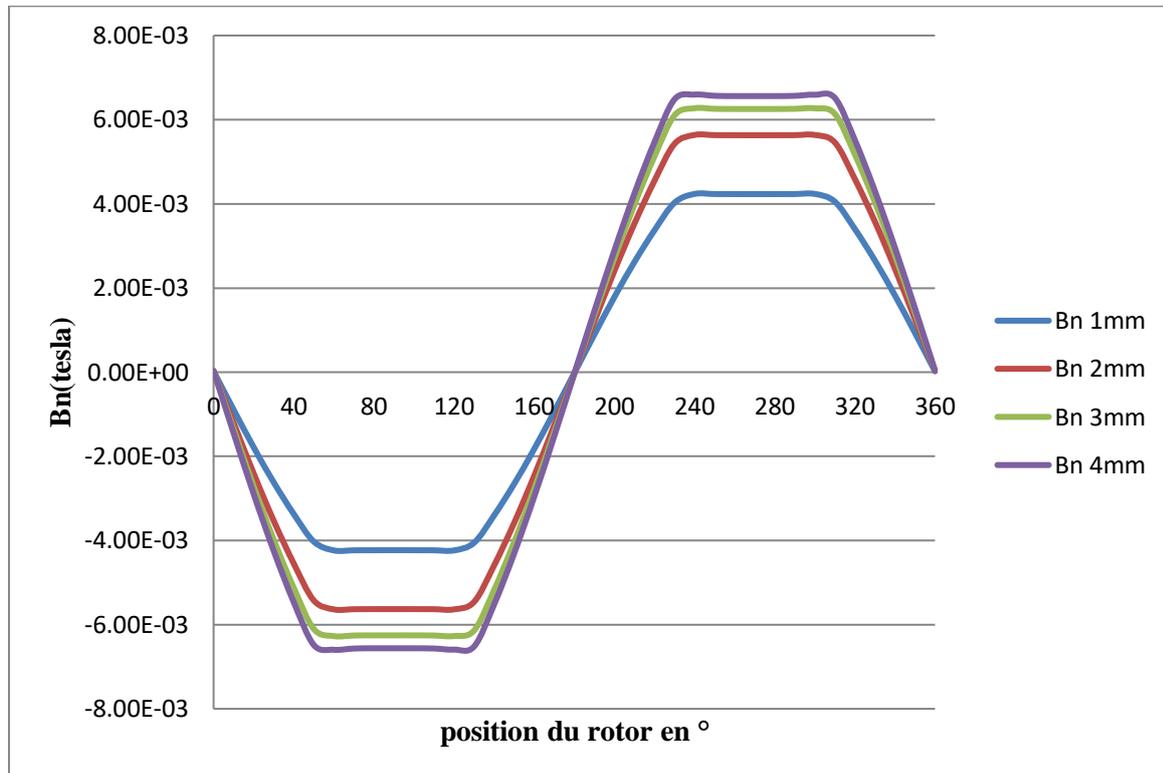


Figure III-34 Induction magnétique B_n

II.6.2 MS a aimants insérés

A) Angle d'ouverture

La Figure (III-35) nous montre la variation de l'induction magnétique en fonction de la position du rotor, en agissant sur l'angle d'ouverture des aimants et sur l'épaisseurs des aimants

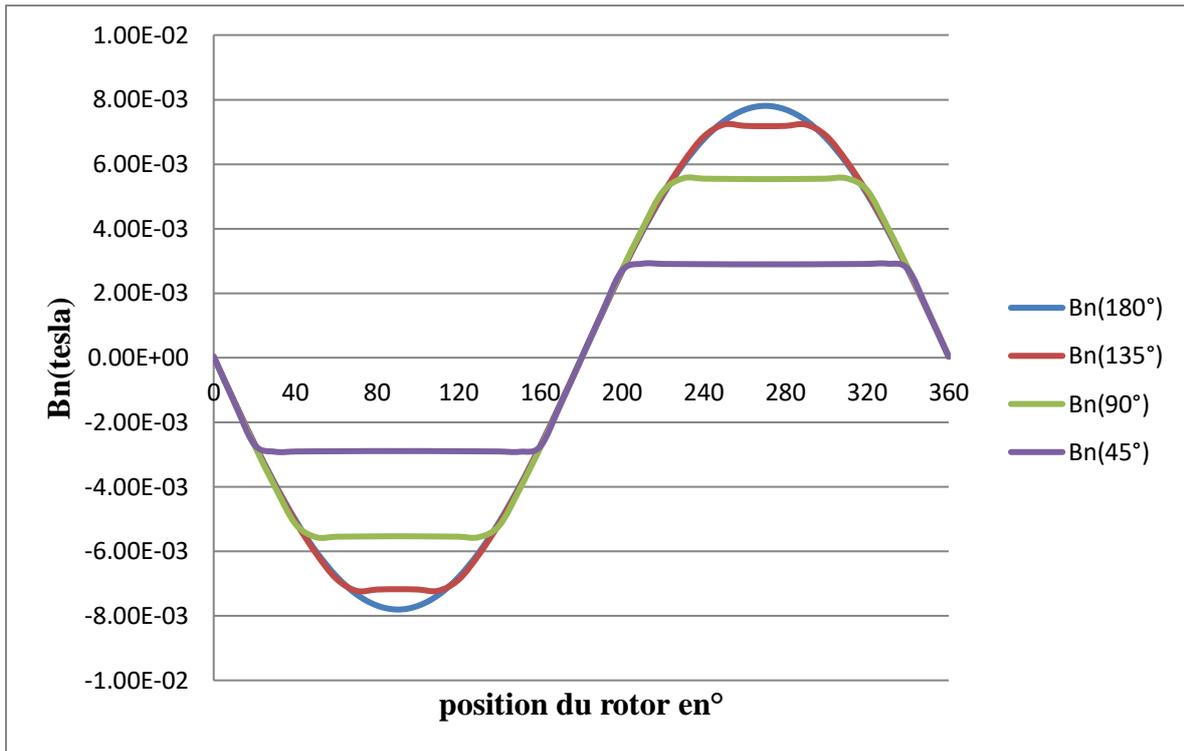


Figure III-35 Induction magnétique B_n

B) Epaisseurs des aimants

Dans la simulation de la (Figure III-36) on a varié l'épaisseur des aimants

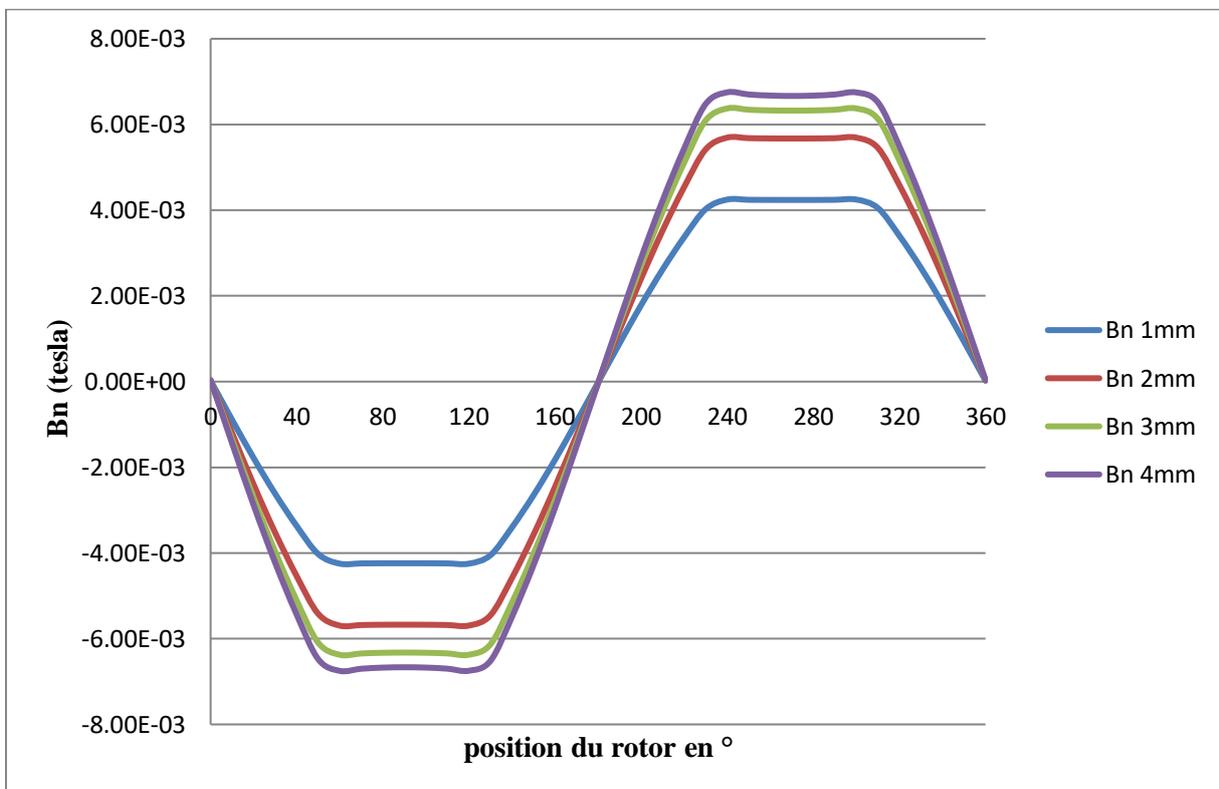


Figure III-36 Induction magnétique B_n

II.6.3 Récapitulatif

	Induction magnétique maximale de l'aimant surfacique	Induction magnétique maximale de l'aimant inséré
Angle d'ouverture des aimants (180°)	0.00781 T	0.00781 T
Angle d'ouverture des aimants (135°)	0.00705 T	0.007226 T
Angle d'ouverture des aimants (90)	0.005477 T	0.005560 T
Angle d'ouverture des aimants (45)	0.0029T	0.0029 T
Epaisseur des aimants (4mm)	0.0067 T	0.00675 T
Epaisseur des aimants (3mm)	0.006331 T	0.06375T
Epaisseur des aimants (2mm)	0.00566 T	0.00569 T
Epaisseur des aimants (1mm)	0.00424 T	0.00426T

Tableau III-7 les valeurs max des inductions magnétiques

On remarque qu'on variant l'angle d'ouverture des aimants, l'amplitude et l'allure des inductances varient et se rapprochent de la sinusoïde. Et en agissant sur l'épaisseur des aimants, l'amplitude de B_n varie en gardant la même allure.

D'après le tableau (III-7) On constate qu'on agissant sur l'angle d'ouverture des aimants ou bien l'épaisseur, l'induction magnétique de l'aimant inséré est plus importante car la reluctance du circuit magnétique est réduite ce qui agit proportionnellement sur l'inductance. Exceptionnellement dans le cas où l'angle d'ouverture est égale à 180°, la MSAP à aimant inséré se confond avec celle à aimants déposés en surface.

Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été l'étude des caractéristiques statiques de la MSAP insérés et déposés en surface et l'influence des différents types des aimants permanents (SMCO, NdFeB, Alnico). Le calcul des inductances propres et des inductances mutuelles ainsi que l'influence de la géométrie des aimants sur les deux structures de la machine étudiée a lui

aussi permis de voir de près la différence entre les deux structures. Toutes les simulations ont été déterminées et calculées par le logiciel FEMM basé sur la méthode des éléments finis.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté porte sur les calculs des champs dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP).

Pour aborder notre étude nous avons présenté au premier chapitre une généralité sur les machines synchrones en particulier la machine synchrone à aimant permanent.

Dans le second chapitre nous nous sommes intéressés à 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.

Les modèles et les simulations qui ont suivi au dernier chapitre nous ont permis de mettre en évidence les flux, les répartitions des lignes de champs et les inductions magnétique des différents aimants, ainsi que le calcul des inductances propres et mutuelles et en finir avec l'influence des paramètres géométriques (épaisseur et angle d'ouverture) sur les performances deux structure de la machine étudiée.

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

- [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, février 2015
- [2] Pierre Mayé : Aide Mémoire Electrotechnique. édition Dunod , Paris, 2006
- [3] Guy Chateigner, Michel Boës, 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, Bigeon 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 aimant 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.