

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 Electrique

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE**  
**MASTER**

**Domaine : Sciences et Technologies**  
**Filière : Electrotechnique**  
**Spécialité : Machines Électriques**

**Thème :**

**Étude d'une machine synchrone à aimants enterrés**

**Présenté par :**

HADJAR Tarik

ZIDANE Zahir

**Encadré par :**

Pr Rachid SAOU

*Année Universitaire : 2022/2023*

# **REMERCIEMENTS**

Le présent travail a été effectué sous la direction de monsieur RACHID SAOU, Professeur à l'université de Bejaia. Nous tenons à lui exprimer nos reconnaissances pour l'intérêt qu'il a constamment porté à ce travail, et pour ses conseils , ainsi que pour ses encouragements et sa gentillesse.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury pour avoir bien voulu examiner ce travail.

Enfin, nous remercions toutes personnes ayant contribué de près ou de loin au bon accomplissement de notre travail.

## **DÉDICACES**

Je dédie ce travail à tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin.

**TARIK**

Je dédie ce travail à tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin.

**ZAHIR**

## Sommaire

Liste des abréviations .....	8
Glossaire .....	9
INTRUDOCTION GENERALE.....	10

## **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MACHINES SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS**

I.1 Introduction.....	13
I.2 Description de la machine synchrone à aimants permanents .....	13
I.3 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents .....	13
I.3.1 Le stator.....	13
I.3.2 Le rotor.....	13
I.4 Rotor de la MSAP .....	14
I.4.1 Aimants en surface.....	14
I.4.2 Aimants insérés.....	15
I.4.3 Aimants enterrés .....	15
I.4.4 Aimants à concentration de flux .....	16
I.5 Principe et mode de fonctionnement d'une machine synchrone à aimants permanents ....	16
I.5.1 Fonctionnement en mode génératrice(GSAP).....	17
I.5.2 Fonctionnement en mode moteur(MSAP) .....	17
I.6 Le couples de la machine synchrone à aimants permanents.....	17
I.6.1 Couple statique .....	17
I.6.2 Couple de réluctance .....	18
I.6.3 Couple de détente.....	18
I.7 Choix du type du bobinage .....	19
I.8 Alimentation des machines à aimants permanents.....	20
I.8.1 Les machine à f.é.m. trapézoïdale.....	20

I.8.2	Machine à f.é.m. sinusoïdale .....	21
I.9	Les aimants permanents.....	21
I.9.1	Aperçu sur son histoire.....	21
I.9.2	Définition d'un aimant permanent .....	21
I.9.3	Les matériaux constitutifs des aimants permanents.....	22
I.9.3.1	Alnico .....	22
I.9.3.2	Les ferrites.....	22
I.9.3.3	Les terres rares .....	23
I.9.4	Courbe de désaimantation d'un aimant.....	23
I.10	Domaines d'application des MSAP .....	25
I.11	Avantages et inconvénients des MSAP .....	26
I.11.1	Avantages .....	26
I.11.2	Inconvénients.....	26
I.12	Conclusion .....	27

## **CHAPITRE II : MODELISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE LA MACHINE ÉTUDIÉE**

II.1	Introduction .....	28
II.2	Equations du champ électromagnétisme .....	28
II.2.1	Les relations constitutives du milieu .....	29
II.2.2	Formulation en potentiel vecteur magnétique.....	30
II.2.3	Application aux modèles magnéostatiques bidimensionnels .....	31
II.3	Conditions aux limites, conditions du passage .....	32
II.3.1	Conditions aux limites .....	32
II.3.2	Conditions du passage .....	33
II.4	La méthode des éléments finis.....	34
II.4.1	Présentation de la méthode des éléments finis .....	34
II.4.2	Principe du calcul par éléments finis .....	34
II.4.3	Les étapes principal de la mise en œuvre de la méthode des éléments finis.. .....	35

II.5 Description du logiciel FEMM .....	36
II.5.1 Le pré-processeur .....	36
II.5.2 Solveur .....	36
II.5.3 Le pos-processeur .....	36
II.5.4 Domaine d'application du logiciel FEMM .....	37
II.6 Présentation de la machine étudiée .....	37
II.6.1 Modèle géométrique de la machine .....	38
II.6.2 Dimensions principales de l'aimant .....	40
II.6.3 Définition de maillage .....	40
II.8 Conclusion.....	41

## **CHAPITRE III : DÉTERMINATION ET ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES STATIQUES DE LA MACHINE D'ÉTUDE**

III.1 Introduction .....	41
III.2 Fonctionnement à vide .....	41
III.2.1 Ligne de flux et carte de l'induction magnétique à vide .....	41
III.3 Répartition de l'induction magnétique normale, le flux et le couple détente, pour des différents matériaux autour de rotor .....	42
III.3.1 Pour l'air .....	42
III.3.1.a L'induction magnétique .....	42
III.3.1.b Le flux .....	43
III.3.1.c Le couple de détente.....	43
III.3.2 Remplacement de la région air dans le rotor par un matériau amagnétique aluminium (AL ,6061-T6).....	44
III.3.2.a Carte de l'induction magnétique .....	44
III.3.2.b L'induction magnétique .....	45
III.3.2.c Le flux des trois phases .....	46
III.3.2.d Le couple de détente .....	46
III.3.3 Remplacement de la région Aluminium dans le rotor par le matériau pure Iron.....	46

III.3.3.a	La carte des lignes de flux magnétique .....	46
III.3.3.b	La carte de l'induction magnétique .....	47
III.3.3.c	L'induction magnétique .....	47
III.3.3.d	Le flux .....	48
III.3.3.e	Le couple de détente.....	49
III.4	Influence des paramètres magnétiques et géomagnétiques sur les performances de la machine .....	49
III.4.1	Influence de type de l'aimant.....	49
III.5	Influence de l'épaisseur de l'aimant .....	51
III.5.1	La répartition de l'induction magnétique .....	51
III.5.2	Le flux.....	52
III.5.3	Le couple de détente.....	52
III.6	Conclusion.....	56
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	57
	<b>Références bibliographiques</b> .....	59
	<b>Annexes</b> .....	61

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> Caractéristiques essentielles .....	25
<b>Tableau II.1</b> Différentes régions de la machine et leurs matériaux .....	39
<b>Tableau II.2</b> Dimensions de la machine d'étude.....	40
<b>Tableau III.1</b> Des amplitudes des inductions dues aux aimants de différentes positions du rotor.....	53
<b>Tableau III.2</b> Les dimensions des épaisseurs de l'aimant .....	54

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> Machine synchrone à aimants permanents .....	13
<b>Figure I.2</b> Stator et rotor de la machine à aimant permanent.....	14
<b>Figure I.3</b> Aimants en surface .....	15
<b>Figure I.4</b> Aimants insérés .....	15
<b>Figure I.5</b> Aimants enterrés .....	16
<b>Figure I.6</b> Aimants à concentration de flux .....	16
<b>Figure I.7</b> Différent couples dans les machine à aimants .....	19
<b>Figure I.8</b> Le courant de phase et la f.é.m. d'un moteur BDCM à 4 pôles.....	21
<b>Figure I.8.a</b> Moteur BDCM à 4 pôles.....	21
<b>Figure I.8.b</b> La forme du courant de phase et la f.é.m. ....	21
<b>Figure I.9</b> Courbe de désaimantation B(H) pour différent types d'aimants [6].....	24
<b>Figure I.10</b> Principales application des machines synchrones à aimants permanents .....	26
<b>Figure II.1</b> Différents étapes de la mise œuvre de MEF.....	35
<b>Figure II.2</b> MSAPE.....	38
<b>Figure II.3</b> Structure complète de la MSAPE étudiée .....	39
<b>Figure II.4</b> Extrait du maillage d'une partie de la machine étudiée .....	41
<b>Figure III.1</b> Configuration des lignes de flux à vide.....	42
<b>Figure III.2</b> Carte d'induction magnétique à vide .....	43
<b>Figure III.3</b> Distribution spatiale de l'induction électromagnétique.....	44
<b>Figure III.4</b> Forme d'onde de flux magnétique des trois phases I=0.....	45
<b>Figure III.5</b> Evolution de couple de détente .....	46
<b>Figure III.6</b> Carte d'induction magnétique.....	47
<b>Figure III.7</b> Distribution spatiale de l'induction électromagnétique.....	47
<b>Figure III.8</b> Forme d'onde du flux magnétique des trois phases I=0.....	48
<b>Figure III.9</b> Couple de détente.....	48
<b>Figure III.10</b> Configuration des lignes de flux magnétique .....	49

<b>Figure III.11</b> Carte d'induction magnétique.....	49
<b>Figure III.12</b> Distribution spatiale de l'induction électromagnétique.....	50
<b>Figure III.13</b> Forme d'onde du flux magnétique des trois phases $I=0$ .....	51
<b>Figure III.14</b> Couple de détente.....	51
<b>Figure III.15</b> Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer pour différentes types d'aimant.....	53
<b>Figure III.16</b> Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans les différentes épaisseurs d'aimant.....	54
<b>Figure III.17</b> Forme d'onde de flux magnétique de la phase 1 pour les deux épaisseurs de l'aimant.....	55
<b>Figure III.18</b> Couple détente de la phase 1 pour les deux épaisseurs d'aimant.....	55

## Liste des abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
F.E.M	Force Electromotrice
FEMM	Analyse par les éléments finis (Finite Element Methode Magnetic)
MEF	Methode des éléments finis
MSAPE	Machine synchrone à aimants enterrés

## Glossaire

Variable	Signification
<b>A</b>	Potentiel vecteur magnétique
<b>Az</b>	Potentiel vecteur magnétique suivant l'axe Z
<b>B</b>	Induction magnétique
<b>Br</b>	Induction magnétique rémanente
<b>E</b>	Champ électrique
<b>H</b>	Champ magnétique
<b>Hcb</b>	Champ magnétique coercitif
<b><math>\Omega</math></b>	Vitesse de rotation
<b><math>\omega</math></b>	Pulsation des courants dans l'induit
<b>P</b>	Nombre de paires de pôles du bobinage de l'induit
<b>f</b>	Fréquence d'alimentation
<b>J</b>	Densité du courant électrique
<b><math>\mu_0</math></b>	Perméabilité magnétique de l'air
<b><math>\rho</math></b>	Charge volumique
<b><math>\mu</math></b>	Perméabilité magnétique du matériau
<b><math>\sigma</math></b>	Conductivité électrique
<b>J0</b>	Densité du courant de source d'alimentation
<b>J<sub>pm</sub></b>	Densité du courant surfacique dû aux aimants
<b><math>\theta</math></b>	Position du rotor par rapport à l'axe du stator
<b>q</b>	Nombre de phases de l'enroulement de l'induit
<b>N</b>	Nombre de spires de l'enroulement de l'induit
<b>Ns</b>	Nombre d'encoches au stator
<b>R1</b>	Rayon extérieur du stator
<b>R2</b>	Rayon intérieur du stator
<b>R3</b>	Rayon extérieur du rotor
<b>R4</b>	Rayon intérieur du rotor
<b>g</b>	L'épaisseur de l'entrefer
<b>h0</b>	Hauteur de l'encoche
<b>b0</b>	Ouverture de l'encoche

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La machine synchrone à aimants permanents a connu une évolution fulgurante depuis le début des années 80, grâce à la disponibilité croissante des aimants permanents à grande densité d'énergie et au développement de l'électronique de puissance. L'utilisation des aimants permanents comme inducteurs dans les machines électriques présente plusieurs avantages significatifs tels que, la réduction des pertes par effet joule, la diminution de l'encombrement causé par les enroulements inducteurs, l'élimination des contacts glissants liés aux balais et la réduction du bruit. L'avantage le plus marquant par rapport aux machines électriques conventionnelles réside dans leur couple massique élevé, qui est particulièrement bénéfique dans les applications industrielles exigeantes en termes d'encombrement et de puissance.

Les machines à aimants permanents, de plus en plus performantes se distinguent par la structure de leur rotor, c'est-à-dire la disposition des aimants.

Le stator de ces machines est généralement de conception classique, avec des encoches. En raison de leurs performances, les machines à aimants permanents ont été adoptées dans de nombreuses applications présentant des structures souvent complexes. Il est donc indispensable de disposer de modèles fiables pour reproduire leur comportement.

L'étude des machines électriques présente diverses complexités, telles que des géométries multiples et complexes ainsi que la non-linéarité des circuits magnétiques impliqués, rendant l'étude difficile et rendant les modèles analytiques insuffisants. Par conséquent, il est indispensable de recourir à des modèles numériques, et l'une des méthodes les plus utilisées est la méthode des éléments finis.

Dans ce contexte, notre travail consiste en la modélisation électromagnétique par la méthode des éléments finis d'une machine synchrone à aimants permanents. Cette machine présente un stator avec un bobinage triphasé, et le rotor est constitué d'aimants permanents enterrés dans le fer. L'établissement d'un modèle électromagnétique pour cette machine nécessite l'étude du comportement du champ magnétique et du champ électrique de ce dispositif. Un formalisme permettant de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques est donc nécessaire, avec les équations de base de l'électromagnétisme, notamment les équations de Maxwell ainsi que les relations constitutives des matériaux et les conditions aux limites. Ces éléments permettront d'obtenir un modèle complet régissant le fonctionnement de la machine.

Pour ce faire, notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les généralités sur les machines synchrones, en fournissant un aperçu succinct des MSAP de leurs constitutions, de leur utilisation ainsi que des différents matériaux utilisés pour la conception des aimants.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'utilisation de la méthode des éléments finis pour la modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents. Cette approche repose sur les relations de Maxwell et est faite avec le logiciel FEMM pour déterminer les performances de la machine étudiée.

Le troisième chapitre constitue la partie application de notre travail, où nous étudions une machine synchrone à aimants enterrés en introduisant son modèle sous forme d'un programme exécuté sous le logiciel FEMM. Cette étude nous permet d'accéder aux calculs des grandeurs telles que l'induction magnétique dans l'entrefer, le flux et le couple de détente. De plus, nous examinons l'influence de certains paramètres physiques et géométriques de l'aimant tels que le type et l'épaisseur.

Enfin, le mémoire se conclut par une conclusion générale, qui récapitule les résultats obtenus et met en évidence les perspectives futures dans le domaine de la modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents.

**CHAPITRE I**

**GÉNÉRALITÉS SUR LES**

**MACHINES SYNCHRONES À**

**AIMANTS PERMANENTS**

## I.1. Introduction

Les machines synchrones jouent un rôle important dans l'industrie. Leur domaine d'emploi consiste à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique ou vice-versa. Ce sont des machines caractérisées par leur vitesse de rotation synchronisée avec la fréquence du réseau [1]. Cette famille de machine comprend en fait plusieurs sous famille :

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

Nous sommes particulièrement intéressés par cette dernière catégorie.

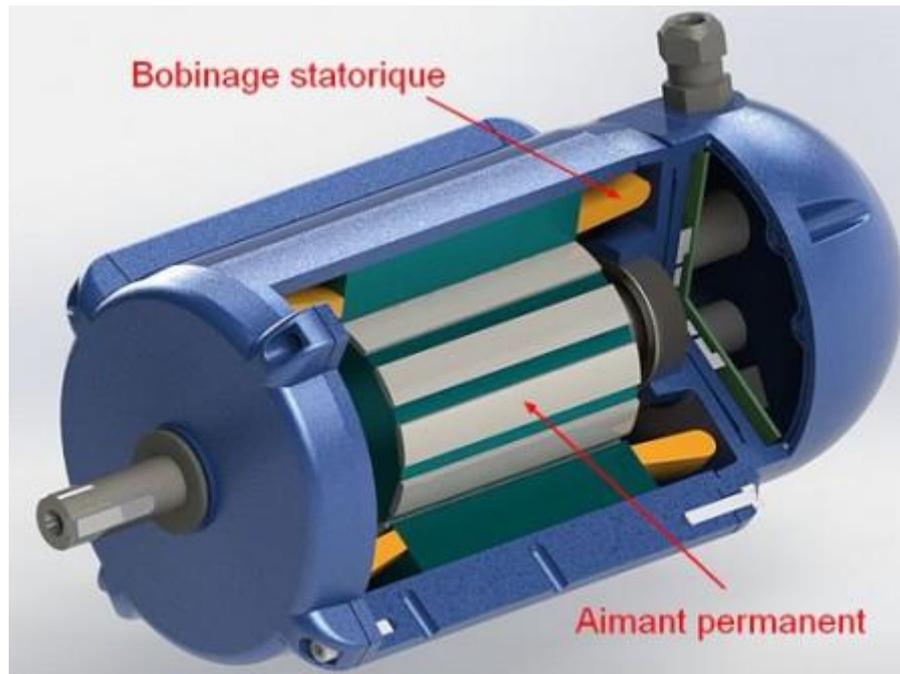
Une machine synchrone à aimants permanents est actuellement le moteur à succès dans un monde industriel, où les exigences sont toujours plus élevées. L'amélioration sensible des performances des aimants modernes a été un des facteurs majeurs de ce succès dans les moteurs servomécanismes haute performances.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

Les machines synchrones peuvent être des machines à aimants permanents (MSAP), des Brushless DC Machines (BDCM) ou des Moteurs Pas à Pas (MPP). On peut les différencier en fonction de la forme des courants traversant le bobinage statorique qui peut être sinusoïdale ou non-sinusoïdale [2].

## I.2. Description de la MSAP

La machine synchrone à aimants permanents est la structure la plus exploitée malgré une fluctuation importante des prix des aimants permanents, le coût des aimants est un critère très important dans le choix de la motorisation pour les applications de cette machine [3].

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique [4]. Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, et la partie tournante appelée rotor. L'entrefer est l'espace aménagé entre les deux armatures.



*Figure I.1 : machine synchrone à aimants permanents*

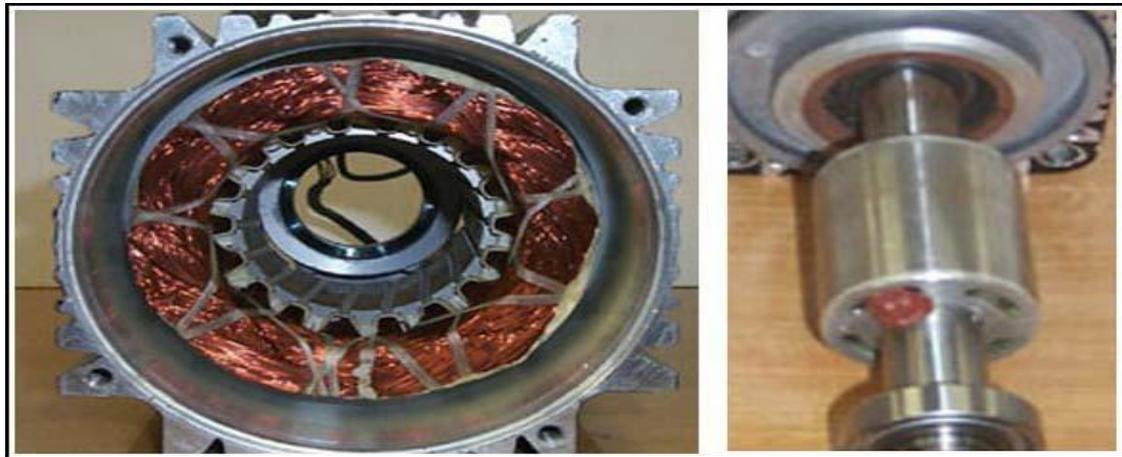
### **I.3. Constitution de la machine synchrone**

**I.3.1 Stator :** il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est logé dans les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer.

Il est généralement construit en tôle à base d'alliage fer-silicium qui permet l'obtention d'une Induction élevée [5].

**I.3.2 Rotor :** les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternants pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f-é-m) alternatives [5]. L'interaction des champs rotorique et statorique donne naissance au couple électromagnétique.

La figure (I.2) représente une image des parties de la machine synchrone à aimant permanent (le stator et le rotor)



**Stator**

**Rotor**

*Figure I.2: stator et rotor de la machine à aimant permanent*

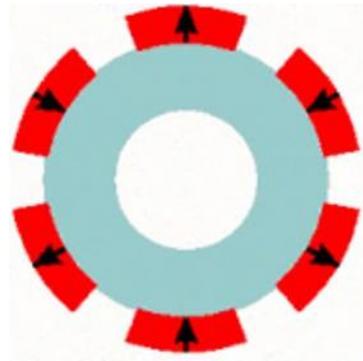
#### **I.4. Rotor de la machine à aimants permanents [6]**

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

- Aimants en surface
- Aimants insérés
- Aimants enterrés
- Aimants à concentration de flux.

##### **I.4.1. Aimants en surface**

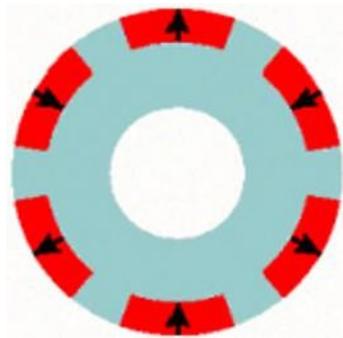
Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur la surface du rotor ; ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure (I.3). Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de ce type est sa simplicité donc faible coût de fabrication par rapport à d'autres machines à aimants. L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage Asynchrone et agir comme un amortisseur. Les réactances synchrones de l'axe  $-d$  et l'axe  $-q$  sont pratiquement les mêmes.



*Figure I.3 : Aimants en surface*

#### **I.4.2. Aimants insérés**

Comme des machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor, Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (I.4). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réactant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe  $-q$  est légèrement supérieure à celle dans l'axe  $-d$ .

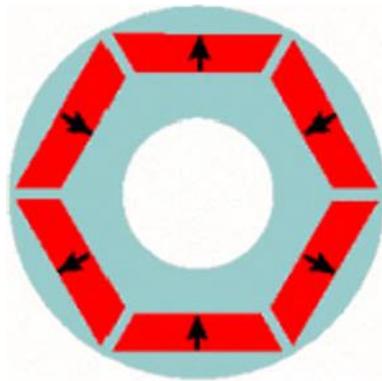


*Figure I.4 : Aimants insérés*

#### **I.4.3. Aimants enterrés**

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor figure (I.5) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe  $-d$  est plus petite que celle de l'axe  $-q$ . Les aimants de cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges.

Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

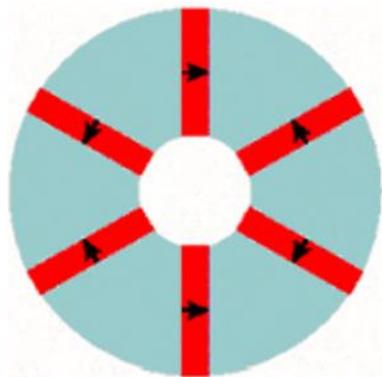


*Figure I.5 : Aimants enterrés.*

#### **I.4.4. Aimants à concentration de flux**

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor et de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence figure (I.6). Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents.

L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux générés par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. [9]



*Figure I.6 : Aimants à concentration de flux*

### **I.5. Principe et modes de fonctionnement de la MSAP**

Dans toute machine électrique quelle qu'elle soit, on pourra toujours distinguer un organe destiné à créer le flux magnétique et que l'on désignera pour cette raison sous le nom "Inducteur" et un organe portant les conducteurs qui sont le siège de forces électromotrices sous

l'effet des phénomènes d'induction et que l'on désigne par le nom "Induit"[7].

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse de  $(f/p)$  tours par secondes avec  $(f)$  fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et  $(p)$  le nombre de paires de pôles.

Le rotor composé de  $p$  aimants permanents ( $2p$  pôles) va alors s'aligner avec le champ tournant.

Le rotor tourne ainsi à la même vitesse que le champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc :  $\Omega = \omega/p$  ; avec  $\omega = 2\pi f$

Le synchronisme des champs magnétiques induit et inducteur impose une procédure spécifique de démarrage (de couplage au réseau en mode alternateur

### **I.5.1. Fonctionnement en mode génératrice(GSAP)**

Avant de connecter la machine synchrone au réseau, il faut lancer le rotor à la vitesse de synchronisme par un moteur annexe, puis en modulant le courant d'induction, amener la FEM. Créée par l'alternateur à la même valeur que la tension du réseau [7].

### **I.5.2. Fonctionnement en mode Moteur(MSAP)**

Un moteur synchrone ne peut démarrer directement à pleinetension depuis le réseau de fréquence  $f=50Hz$  (Car le rotor a une vitesse nulle au démarrage  $\Omega \neq \omega$ ). Pour une alimentation directe en  $50 Hz$ , il faudrait donc au préalable amener la charge à la vitesse nominale par un moteur auxiliaire puis connecter l'alimentation [7].

## **I.6. Couples de la machine synchrone à aimants permanents**

On évalue les performances d'une machine à aimants permanents sur la base de critères économiques et techniques tels que le couple volumique et le minimum d'ondulations dans le couple lié à la structure ou à l'alimentation.

Les différents couples existants dans une machine à aimant permanent sont [8]:

### **I.6.1 Couple statique**

Le Couple statique est dû à l'interaction entre les courants d'induit et le champ inducteur. Celui-ci est donc limité par :

- l'induction maximale dans l'entrefer, celle-ci ne doit pas dépasser la valeur à saturation du matériau, notamment dans les machines à concentration de flux. Elle doit être réduite

aux grandes vitesses à cause des pertes fer qu'elle induit dans les parties statoriques ;

- la densité de courant statorique afin d'atténuer les pertes Joule ainsi que l'échauffement de la machine.

### **I.6.2 Couple de réluctance**

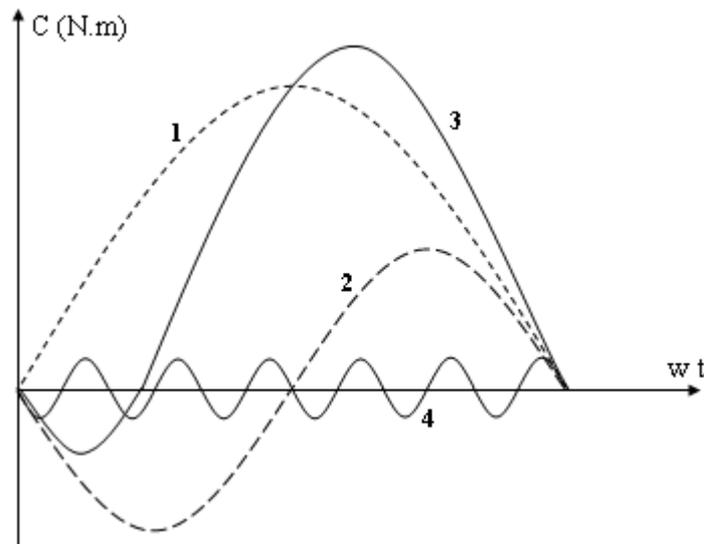
Dans les machines à entrefer variable (effet de saillance rotorique) le couple produit par la machine est dû au couple d'interaction et au couple de réluctance figure (I.7).

Le couple de réluctance est dû à l'anisotropie du rotor. Comme le couple de réluctance est proportionnel au carré du courant, plus la valeur du courant est élevée, plus le décalage par rapport au maximum du couple varie. Cette variation diminue en intensité avec l'augmentation du nombre de paires de pôles car l'effet d'anisotropie est alors moindre.

### **I.6.3 Couple de détente**

Appelé aussi couple de denture ou couple de réluctance d'encoches. C'est un couple pulsatoire dû à l'interaction des aimants avec les dents statoriques. En d'autres termes, c'est un couple dû à la variation de l'énergie magnétique au sein du moteur lorsque le rotor tourne à vide.

Celui-ci est essentiellement dû aux forces qui s'exercent sur les extrémités des aimants. Les encoches du milieu de l'aimant, en raison de la symétrie des lignes de champ à vide, n'exerce aucune force tangentielle sur le rotor ; par contre, aux extrémités du pôle, les lignes de champ sont dissymétriques, il s'exerce alors un effort sur le rotor.



*Figure I.7: Différents couples dans les machines à aimants :*

- 1- Couple d'interaction ;
- 2- Couple de réluctance ;
- 3- Couple résultant (somme des couples d'interaction et de réluctance) ;
- 4- Couple de détente (pour une structure de stator avec 6 encoches sous un pôle).

### **I.7. Choix du type du bobinage [9]**

- **Ondulé :** Le plus facile à réaliser, les groupes sont fabriqués directement grâce à des gabarits. Il n'y a plus qu'à connecter suivant le mode « E-S-E-S... » Ils présentent une légère surintensité du fait que les groupes sont constitués de bobines de diamètres différents.
- **Imbriqué :** Un peu moins facile à réaliser, les groupes sont fabriqués directement grâce à des gabarits. Il n'y a plus qu'à connecter suivant le mode « E-S-S-E-E-S-S... » Ils présentent une légère surintensité du fait que les groupes sont constitués de bobines de diamètres différents.

- **A pas diamétral** : Le plus long à réaliser, car il faut réaliser toutes les bobines une par une puis à les connecter suivant le mode « E-S-E-S... » Ils présentent **les meilleures caractéristiques électriques** du fait que les groupes sont constitués de bobines de diamètres identiques. Il est possible d'assembler les bobines phase par phase ou plusieurs bobines par phase.

## **I.8. Alimentation des machines à aimants permanents**

Les machines à aimant peuvent être classées d'après la distribution de l'induction et la forme du courant d'alimentation en deux grandes classes [9 ,10] :

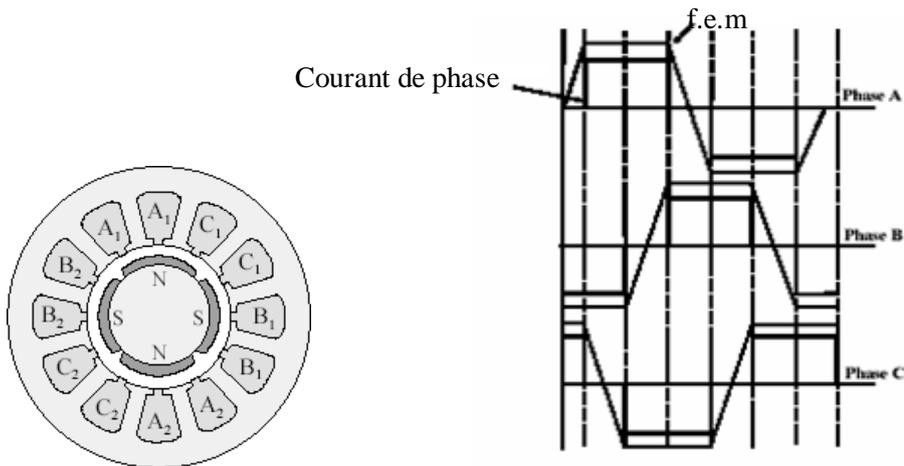
- Les machines à f.e.m trapézoïdale dites BDCM (Brushless Direct Current Machines).
- Les machines à f.e.m sinusoïdale dites PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machines).

### **I.8.1. Les machines à f.e.m trapézoïdale**

Les moteurs à courant continu sans commutateur (BDCM) ont été introduits en 1962 par T.G.Wilson et PH. Trickey. Ces moteurs appelés parfois ECM (Electronically Commutated Motors) est la copie quasi-conforme du moteur à courant continu à la différence près que la fonction de commutation réalisée mécaniquement par le collecteur est effectuée électriquement sans qu'aucun contact entre le stator et le rotor ne soit nécessaire. Elle présente donc les avantages d'une machine à courant continu à savoir un couple facile à asservir à travers le courant d'induit, en éliminant ses inconvénients [11].

Ces machines ont une force contre électromotrice de forme trapézoïdale ou rectangulaire. L'alimentation de ces machines demande des courants statoriques rectangulaires et un enroulement statorique concentré pour produire un couple constant. À cause de la forme trapézoïdale, la position du rotor est commandée pour régler le courant circulant à travers deux phases statoriques. Ce type de machine est très utilisé à cause de la simplicité de sa commande; une seule boucle de courant suffit, donc peu coûteuse; cependant, un simple retard de commutation peut causer un grand couple pulsatoire, cela est l'inconvénient majeur qui fait que ce type de machine n'est pas utilisé pour les machines de grandes performances

Afin de minimiser les couples pulsatoires, on alimente la machine avec des créneaux de courant de  $120^\circ$ . Cette alimentation consiste à alimenter à tous instants deux phases du moteur avec des créneaux de courant. La figure (I.8.a) montre la géométrie d'un moteur à courant continu à 4 pôles avec un enroulement concentré triphasé et la figure (I.8.b) montre le courant statorique et la forme d'onde de la f.e.m.



**Figure I.8.a :** Moteur BDCM à 4 pôles  
la f.e.m

**Figure I.8.b :** La forme du courant de phase et

**Figure I.8 :** Le courant de phase et la f.e.m d'un moteur BDCM à 4 pôles

## I.8.2. Les machine à f.e.m sinusoïdale

En principe, les machines à f.e.m sinusoïdale ne diffèrent pas des machines à f.e.m trapézoïdale dans la conception, cependant la forme d'onde du courant d'excitation est dans ce cas sinusoïdale, ce qui élimine l'ondulation du couple causée par la commutation. Ces machines présentent plusieurs avantages comparés aux (BDCM) comme : la capacité de contrôle du couple, le rendement ainsi que le fonctionnement dans une large gamme de puissance. Pour les entraînements de précision (robotique), ces machines sont préférées aux BDCM [12].

## I.9. Les aimants permanents

### I.9.1. Aperçu sur son historique

L'aimant doit son origine au latin ADAMAS qui signifie fer, diamant .Les aimants permanent ont vu le jour aux environ 600 ans avant J-C. Mais ce fut au début de ce siècle qu'eut lieu le véritable essor des aimants permanents dont ils ont pris leur place dans tous les domaines et surtout dans les machines électriques [13,14].

### I.9.2. Définition des aimants permanents

On appelle un aimant permanent tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile de se désaimanter lorsqu'il est aimanté [15].

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne

résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieure.

### **I.9.3. Les matériaux constitutifs des aimants permanents**

De nos jours, les principaux matériaux utilisés pour fabriquer les aimants permanents sont : les alliages Aluminium, Nickel, Cobalt (AlNiCo) ; Strontium ferrites et Baryum ferrites (ferrites) ; Samarium Cobalt (première génération des aimants à terre rares) (SmCo) ; Néodyme Fer Bore (deuxième génération des aimants à terre rares) (NdFeB).

#### **I.9.3.1. Les AlNiCo**

Les AlNiCo ont été découverts au Japon et ont été développés dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. Les AlNiCo sont des alliages à base d'Aluminium, de Nickel, et de Cobalt [16].

Les attributs principaux des AlNiCo sont:

- Une induction rémanente relativement élevée ( $B_r \approx 1T$ );
- Faible champ coercitif, d'où risque élevé de démagnétisation;
- Un prix de revient élevé dû à l'utilisation du Cobalt ;
- Dureté et rigidité (facile à casser) ;
- Une température de curie élevée (très stable) ;
- Fonte à une variété de forme.

L'utilisation de ces aimants est aujourd'hui en nette régression à cause de non linéarité de leur caractéristique de démagnétisation et la cherté du Cobalt.

#### **I.9.3.2 Les ferrites**

Les ferrites sont des composés d'oxyde de fer de Baryum ou de Strontium. Ils sont obtenus par frittage [16].

Introduits en 1953, les ferrites sont rapidement devenus en 1960, les matériaux à aimant les plus compétitifs au niveau de leur prix et les plus utilisés.

Les ferrites sont beaucoup moins durs que les aimants métalliques AlNiCo, thermiquement stables, possèdent une caractéristique de démagnétisation pratiquement linéaire et un grand champ coercitif ce qui leur confère une bonne résistance à la démagnétisation. Une autre propriété importante des aimants céramiques est leur résistivité électrique importante qui supprime la possibilité de circulation de courant de Foucault, ils sont donc préférés pour les utilisations à hautes fréquences [16].

Les ferrites présentent toutefois une faible induction rémanente (0,4 ~ 0,6T), d'où la nécessité de recourir à des structures complexes de machines à concentration de flux pour atteindre des couples massiques et volumiques élevés.

### I.9.3.3 Les terres rares

C'est la dernière génération des aimants permanents. Ils sont plus performants du fait qu'ils réunissent simultanément deux qualités essentielles à savoir : une induction rémanente élevée et un grand champ coercitif.

On citera :

- Les Samarium Cobalt qui sont caractérisés par une grande induction rémanente et un grand champ coercitif comme le  $\text{SmCO}_5$  avec ( $B_r \approx 0.8T$ ) et ( $H_c \approx 600KA / m$ ) et le  $\text{Sm}_2\text{CO}_{17}$  avec ( $B_r \approx 1T$ ) et ( $H_c \approx 600KA / m$ ) ; de plus ; ils présentent une énergie spécifique des plus importantes et une température de curie relativement élevée [17]. Cependant, leur prix de revient élevé dû à l'utilisation de Cobalt (matériau stratégique) d'une part, et la complexité de leur technologie de fabrication d'autre part, limitent leur utilisation aux machines à très hautes performances (aérospatiales, robotiques, Aéronautiques) [18].
- Les Néodyme Fer Bore qui présentent des performances supérieures au Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur sensibilité à la température affecte leur performance. De plus ils ont tendance à s'oxyder à cause du fer qu'ils contiennent.

Des progrès récents ont permis d'accroître leur tenue en température, ce qui fait d'eux les matériaux à aimants les plus utilisés de nos jours [18].

Les terres rares sont en réalité plus abondantes dans la nature que ne laisse penser leur dénomination, c'est en fait la séparation des terres qu'on trouve mélangées dans les minerais naturels qui demande des investissements lourds.

### I.9.4 Courbe de désaimantation d'un aimant

Le cycle d'hystérésis correspond à la courbe  $B(H)$  qui montre la variation de l'induction en fonction du champ magnétique  $H$ , on s'intéresse au deuxième quadrant du plan  $B(H)$  qui nous donne la courbe de désaimantation suivante :

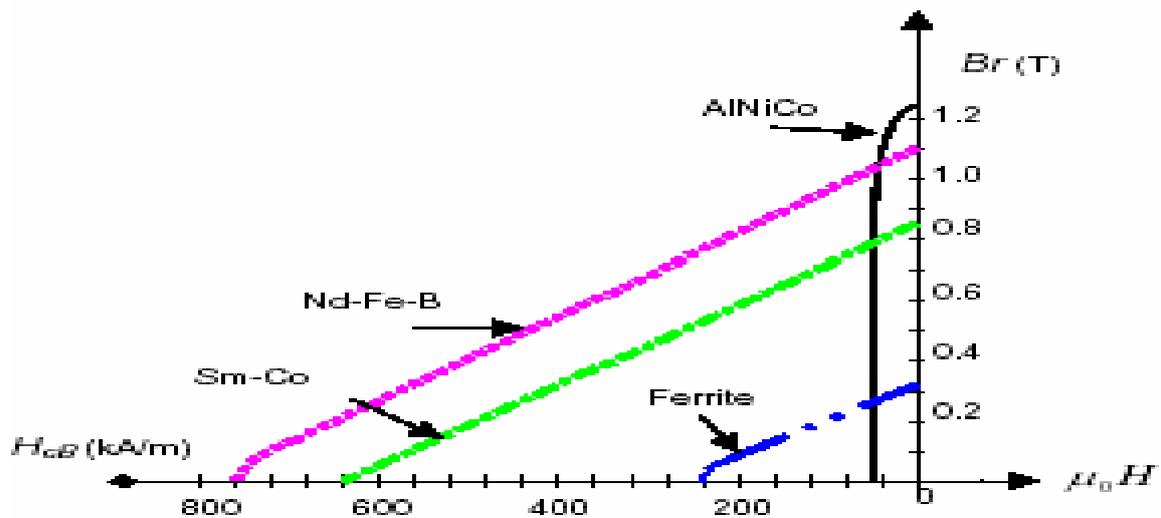


Figure I.9 : Courbe de désaimantation  $B(H)$  pour différents types d'aimants [6]

On peut voir que les AlNiCo et ferrites sont instables et que les NdFeB et SmCo sont les plus résistants aux champs démagnétisant.

Elle est caractérisée par les paramètres suivants [6] :

- **L'induction rémanente ( $B_r$ )** : c'est l'induction résiduelle au circuit fermé, c'est -à- dire une induction de la puissance potentielle de l'aimant.
- **Le champ coercitif ( $H_{cb}$ )** : il caractérise le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable.
- **Produit d'énergie volumique ( $BH$ ) max** : ce produit est couramment appelé énergie spécifique de l'aimant, cette énergie caractérise la qualité du matériau. En effet pour un entrefer donné, le volume est d'autant plus faible, que l'énergie spécifique est élevée.

Les paramètres  $B_r$  et  $H_c$  dépendent aussi de la température, la désaimantation d'un aimant est influencée par l'élévation de la température et de la durée d'exposition à celle-ci. La température à laquelle l'aimantation de l'aimant est réduite à zéro est appelée la température de Curie.

On peut comparer les différents aimants cités précédemment à l'aide du tableau suivant [5] :

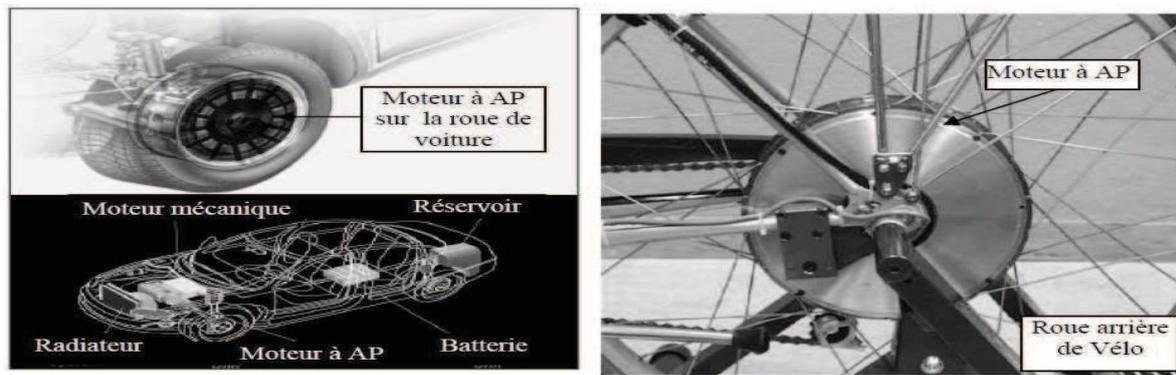
**Tableau I.1** : Caractéristiques essentielles

<b>Matériaux</b>	<b>Br (T)</b>	<b>Hc (kA/m)</b>	<b>(BH)<sub>max</sub> (kJ/m<sup>3</sup>)</b>	<b>T° de Curie (°C)</b>	<b>Remarques</b>
<b>AlNiCo</b>	0.8 à 1.3	50 à 160	40 à 50	500	Cher, désaimantation facile.
<b>Ferrites</b>	0.2 à 0.4	140 à 300	10 à 40	200	Faible aimantation, prix bas.
<b>Samarium Cobalt (SmCo)</b>	0.9 à 1.15	1000 à 2000	160 à 200	250 à 350	Prix élevé à cause du Cobalt
<b>Néodyme fer bore (NdFeB)</b>	1.4	1000	400	100 à 200	Prix moyen, oxydation facile.

### **I.10. Domaines d’application des machines à aimants permanents**

Le moteur synchrone à aimant est employé dans de nombreuses applications [19] :

- a. Véhicules électriques routiers;
- b. Processus d’automatisation ;
- c. Systèmes de sécurité (portails automatiques des garages par exemple);
- d. Les ascenseurs;
- e. Les escaliers roulants;
- f. Actionnement des pistes de décollage pour le contrôle des vols aériens.



(a) Voitures hybrides

(b) vélo électrique

**Figure I.10 :** principales applications des machines synchrones à aimants permanents

## I.11. Avantages et inconvénients des MSAP

La machine synchrone à aimants permanents possède plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres machines à courant continu, asynchrone...

### I.11.1 Avantages

A titre d'illustration, quelques avantages de la MSAP, sont cités ci-dessous [6]:

- ✓ Rendement plus élevé grâce à l'utilisation d'aimants permanents en remplacement des enroulements rotoriques. Ainsi, le rotor n'a pas besoin d'être alimenté ce qui diminue les pertes (absence des pertes joules) ;
- ✓ Fiabilité de la machine en raison de l'absence de bagues et de balais ;
- ✓ Simplicité de conception et d'entretien due également à l'absence de bagues et de balais ;
- ✓ Performance dynamique élevée grâce à une densité de flux importante dans l'entrefer ;
- ✓ Simplicité de contrôle en fonctionnement générateur avec notamment l'absence de régulation de vitesse et de tension.

### I.11.2 Inconvénients

Parmi les inconvénients des MSAP, on cite :

- Coût élevé à cause du prix des aimants ;
- Problème de tenue température des aimants permanents (250°C pour le samarium-cobalt) ;
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit ;

- Difficulté de dé fluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position) ;
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Difficultés liées au démarrage de la machine en fonctionnement moteur.

## **I.12.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation de la machine synchrone. Dans un premier temps, nous avons abordé une description de la machine synchrone à aimants permanents avec une présentation de leurs différentes structures avec les avantages, inconvénients et ses domaines d'application. Ensuite, nous sommes passés à la présentation détaillée des aimants permanents ( histoire, caractéristiques, propriétés).

**CHAPITRE II**

**MODELISATION PAR**

**ÉLÉMENTS FINIS DE LA**

**MACHINE ÉTUDIÉE**

## II.1.Introduction

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.

Au profit des avantages qu'elles présentent, les machines synchrones à aimants permanents attirent l'intention des industriels et des chercheurs. De ce fait, dans ce présent chapitre on s'intéressera à la présentation de la machine synchrone à aimants permanents enterrés, les équations régissant le fonctionnement de notre machine en considérant le problème de type magnéto-statique 2D, le logiciel FEMM utilisé pour la modélisation de cette machine.

## II.2.Equations du champ électromagnétique

Les équations locales de l'électromagnétisme ou "équations de Maxwell" décrivent le comportement local dans le temps et dans l'espace des grandeurs électriques et magnétiques et leurs interactions mutuelles. Les quatre équations suivantes présentent la forme la plus générale des équations de Maxwell [20] :

➤ **Equation Maxwell-Faraday :**

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

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

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

➤ **Équation Maxwell-Ampère :**

$$\overrightarrow{rot} \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (II.2)$$

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

$\vec{J}$  : Densité de courant [A.m<sup>-2</sup>]

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

➤ **Équation Maxwell-Gauss :**

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

$\vec{D}$ : Vecteur induction électrique [C/m<sup>2</sup>].

$\rho$ : Charges volumiques [C.m<sup>-3</sup>].

➤ **Équation de conservation de flux magnétique**

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

L'équation (II.1) et l'équation (II.2) montrent le couplage entre le champ E et l'induction B

### II.2.1 Les relations constitutives du milieu

La résolution des équations de Maxwell ne peut s'effectuer sans les relations constitutives du milieu. Une relation constitutive décrit localement le comportement des grandeurs électromagnétiques dans un matériau donné [20].

Pour les aimants permanents  $\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r$  (II.5)

Pour les milieux ferromagnétiques  $\vec{B} = \mu \vec{H}$

Avec

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$\vec{B}_r$  : Induction magnétique rémanente (cas d'aimants permanents) [T]

$\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du milieu.

$\mu$  : Perméabilité magnétique absolue [H.m<sup>-1</sup>].

❖ **La loi d'ohm**

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

Avec

$\sigma$  : Conductivité électrique [ $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

$\vec{J}_s$  : Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

Les relations précédentes sont données dans le cas le plus général : dans un matériau ferromagnétique sans induction rémanente, le terme  $B_r$  de l'équation devient nul.

Dans le cas des aimants permanents, l'induction rémanente  $\vec{B}_r$  s'exprime en fonction du Vecteur aimantation  $\vec{M}$  comme suit :

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M}$$

### II.2.2 Formulation en potentiel vecteur magnétique

Il est souvent avantageux de reformuler le système précédent en introduisant les potentiels du champ. Différentes formulations sont utilisées parmi lesquelles nous choisissons la formulation **Potentiel vecteur magnétique- Potentiel scalaire (A-V)**

L'équation  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  implique que l'induction  $\vec{B}$  est le rotationnel d'un vecteur  $\vec{A}$  tel que :

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

$\vec{A}$  Est le potentiel vecteur magnétique défini à un gradient près.

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial \text{rot } \vec{A}}{\partial t} = \text{rot} \left( -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$$

Utilisant l'équation (3.3), l'équation (3.1) a permis d'écrire :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } V$$

V : Potentiel scalaire électrique

Et si  $\frac{\partial}{\partial t}=0 \Rightarrow \vec{E} = -grad\vec{V}$  (Électrostatique)

À partir de l'équation 3.1.c, on est amené à résoudre

$$rot\left(\frac{1}{\mu} rot\vec{A}\right) = -\sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} + grad\vec{V}\right) + \vec{J}_0 + \vec{J}_{PM} \quad (II.7)$$

A et V doivent vérifier :

$$div\left(-\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \sigma grad\vec{V} + \vec{J}_0 + \vec{J}_{PM}\right) = 0$$

La résolution de l'équation II.7 associée aux conditions aux limites décrivant le problème physique donne le potentiel vecteur  $\vec{A}$ , à un potentiel scalaire près.

Pour l'unicité de la solution, on impose une condition supplémentaire sur la divergence du potentiel vecteur  $\vec{A}$ . La jauge de Coulomb est habituellement utilisée. Elle est implicitement satisfaite en 2 D

$$div\vec{A} = 0$$

Elle permet de découpler partiellement les potentiels A et V.

V vérifie alors :

$$grad\vec{V} = 0$$

Le potentiel scalaire V est alors de nature électrostatique ou électrocinétique. En l'absence de ce type de source on a :

$$\vec{E} = -\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}$$

Et le champ E est dit électromoteur.

### II.2.3 Application aux modèles magnéostatiques bidimensionnels

Dans ce cas les champs sont indépendants du temps, on est en présence d'un régime statique et le problème à résoudre est dit magnéostatique. La formulation en magnéostatique peut être déduite simplement par l'annulation du terme  $\sigma$  de l'équation II.7. L'équation obtenue

est la suivante [21] :

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu}\text{rot}\vec{A}\right)=\vec{J}_0+\vec{J}_{pm} \quad (\text{II.8})$$

Alors le potentiel vecteur n'a plus qu'une seule composante  $\vec{A}_Z$ . (Orthogonale au plan d'étude) et la conduction  $\text{div}(\vec{A}_Z) = \mathbf{0}$  est naturellement vérifiée

Avec :

$$\vec{A} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_Z \end{bmatrix} \quad \vec{J} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_Z, J_{pm} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9.a})$$

Avec  $\vec{B} = \text{rot}(\vec{A})$

$$\vec{B} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} B_x = \frac{\partial A}{\partial y} \\ B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \\ B_z = 0 \end{bmatrix} \quad \vec{H} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} H_x = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \\ H_y = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \\ H_z = 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9.b})$$

L'équation (II.8) se restreint finalement à l'équation de poisson suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_Z}{\partial y} \right) = (J_Z + J_{pm}) \quad (\text{II.10})$$

Cette dernière équation représente l'équation aux dérivées partielles qu'on doit résoudre, en tenant compte des conditions aux limites qu'on citera dans les paragraphes qui suivent.

## II .3. Conditions aux limites (conditions de passages)

### II.3.1 Condition aux limites

#### ➤ Condition de Dirichlet

La Condition de Dirichlet impose la valeur exacte de l'inconnue sur la frontière du domaine de résolution.

$$A = A_0 \quad (\text{II.11})$$

Avec

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

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

➤ **Condition de Neumann**

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

$$\frac{\partial A}{\partial n} \text{ donné} \quad (\text{II.12})$$

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

**II .3.2. Condition de passage**

À la séparation de deux milieux notés 1 et 2, de perméabilité magnétique  $\mu_1$  et  $\mu_2$ , on doit assurer la continuité de la composante normale de l'induction. Lorsqu'il n'y a pas de courant superficiel, il y a la continuité de la composante tangentielle du champ électromagnétique.

$$\begin{cases} B_{n1} = B_{n2} \\ H_{t1} = H_{t2} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

➤ Dans le conducteur :

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

➤ Dans le fer :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{II.15})$$

➤ Dans l'air :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (\text{II.16})$$

➤ Dans les aimants :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{pm} \quad (\text{II.17})$$

➤ Sur le contour de la machine

$$A_z = 0 \quad (\text{II.18})$$

La résolution des équations précédentes se fait par la méthode des éléments finis.

## II.4. La méthode des éléments finis

### II .4.1 Présentation la méthode des éléments finis

Historiquement, les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1950-1960.

En 1970, Sylvester et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés, à l'adaptation de cette méthode, à la résolution des problèmes elliptiques de l'Electrotechnique.

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

Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système.

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 [20].

### II.4.2. Le principe du calcul par éléments finis

Le principe du calcul par éléments finis est de diviser la structure de la machine étudiée en nombre important d'éléments de dimensions finies puis de résoudre les équations de Maxwell sur chacun de ces éléments. Les conditions aux limites de chaque élément sont fixées par les éléments voisins. La combinaison de tous ces éléments de calcul permet alors de connaître l'état magnétique de la structure complète et donc d'effectuer des calculs de flux, de force, et d'inductance...

L'intérêt de cette méthode de calcul est qu'elle permet, comme tout calcul théorique, d'avoir accès aux trois étapes de manière indépendante. La méthode des éléments finis discrétise une formulation intégrale de l'équation aux dérivées partielles pour conduire à un système d'équations algébriques qui fournit une solution approchée du problème étudié.

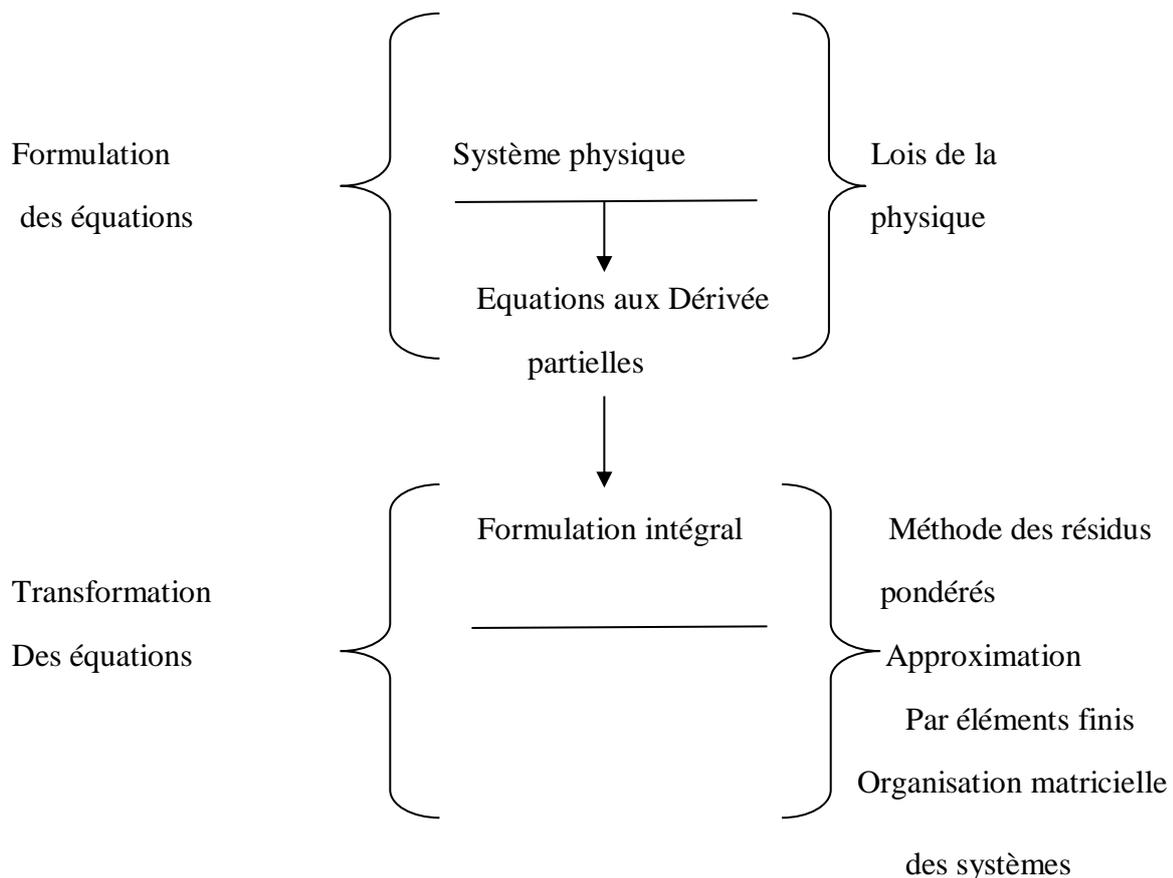
Le domaine d'étude est décomposé en un nombre fini d'éléments polygonaux qui forment le maillage. La valeur du potentiel vecteur est déterminée sur tous les sommets des polygones (les sommets sont appelés les nœuds du maillage). En employant des fonctions d'interpolation appropriées, la solution en tout point du domaine sera déterminée en fonction des valeurs aux

sommets de l'élément. Pour transformer un système d'équations aux dérivées partielles par une formulation intégrale, les processus les plus souvent utilisés sont la méthode des résidus pondérés et la méthode variationnelle [22].

### II.4.3. Les étapes principales de la mise en œuvre de la Méthode des éléments finis

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis repose sur trois étapes essentielles [7]:

- Formulation des équations aux dérivées partielles à partir des lois physique.
- 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 de logiciels appropriés.



**Figure II.1** : Différentes étapes de la mise œuvre de MEF

## II.5. Description du logiciel FEMM

FEMM est un ensemble de programmes pour la résolution, en basse fréquence, par la méthode des éléments finis, des problèmes magnétostatiques et électrostatiques bidimensionnels dans un domaine plan ou axisymétrique. Ce logiciel est divisé en trois modules [7] :

### II .5.1. 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

### II.5.2 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.

### II.5.3 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.5.4 Domaines d'application de logiciel FEMM

Le logiciel permet d'aboutir à des solutions concrètes, il est applicable pour l'analyse des comportements électriques ci-dessous : [21]

- Magnétisme : calcul des grandeurs électriques et magnétiques dues à des aimants, à des flux imposés, à des courants continus ou variables, imposés ou induits.
- Electrostatique : calcul en régime permanent des potentiels et champs électriques avec ou sans circulation de courants dans les milieux diélectriques ou conducteurs.
- Thermique : calcul de la répartition des températures créées par des puissances dissipées, des différences de températures ou des flux thermiques.

#### II.6. Présentation de la machine d'étude

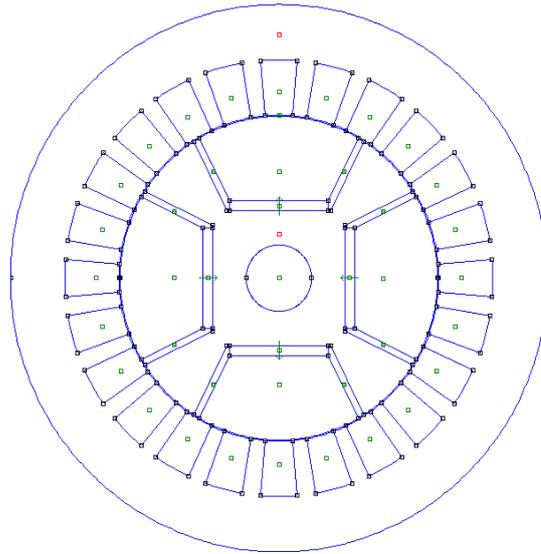
La machine étudiée est une machine synchrone triphasée à quatre (4) aimants enterrés au niveau du rotor et ayant 24 encoches au stator ;

Cette machine est alors définie par un nombre d'encoches par pôle et par phase  $N_{ep}$  entier :

$$N_{ep} = \frac{N_e}{2p \cdot q} \quad (\text{II.19})$$

Où

- $N_e$  : nombre d'encoches
- $p$  : nombre de paires de pôles
- $q$  : nombre de phases



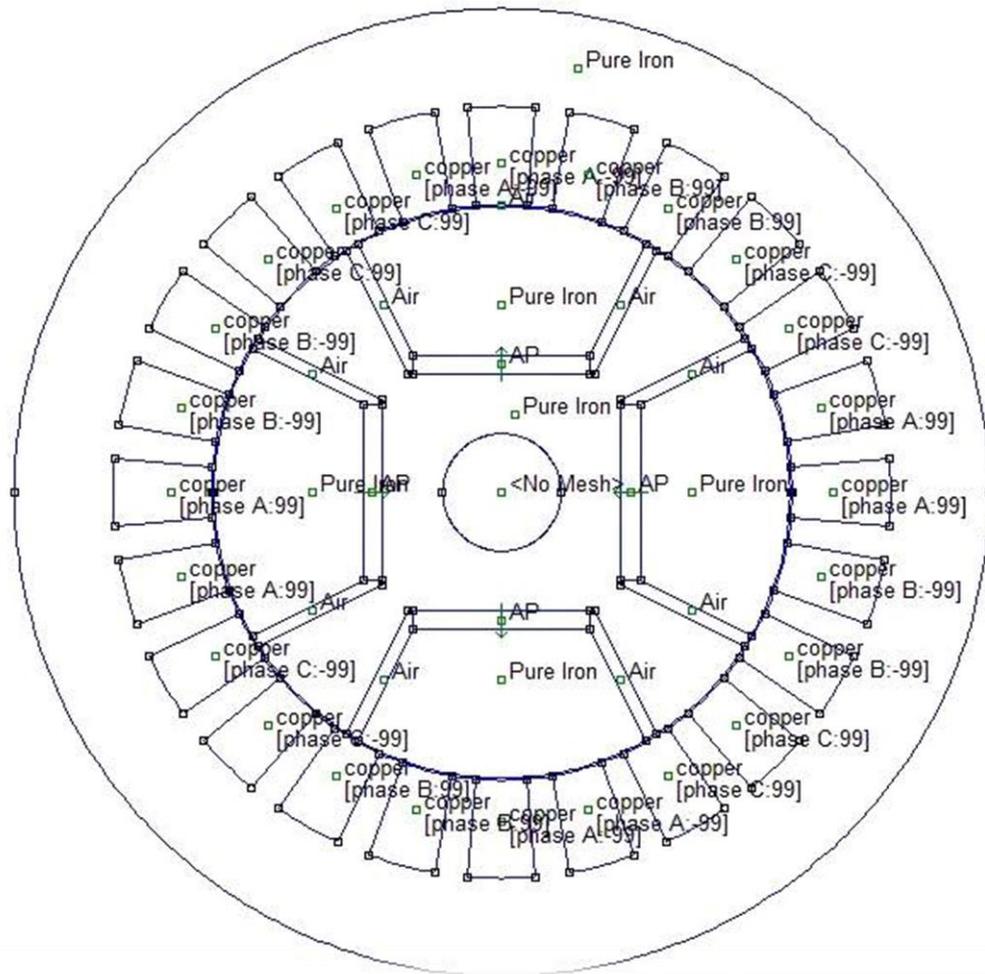
**Figure II.2 MSAPE**

### **II.6.1 Modèle géométrique de la machine**

Avant de modéliser la machine, on impose quelques hypothèses simplificatrices à savoir :

- Le modèle d'étude est bidimensionnel (effets d'extrémités négligeables).

Après avoir réalisé la géométrie de la structure complète en 2D, affecté aux différentes régions de la machine les matériaux nécessaires à la conception et défini les conditions aux limites ( $A=0$ ), on obtient dans FEMM :



**Figure II.3** Structure complète de la MSAPE étudiée

A partir de la figure (II.3), on distingue cinq régions principales constituant la machine, chacune de ces régions est définie par un matériau la constituant comme le montre le tableau suivant :

**Tableau II.1** Différentes régions de la machine et leurs matériaux

<b>Régions</b>	<b>Matériaux</b>
Le noyau polaire	Fer pur (Pure Iron)
La culasse statorique	Fer pur (Pure Iron)
Les encoches statoriques	Cuivre (Copper)
L'entrefer	Air
Les aimants permanents	NdFeB

## II.6.2 Dimensions principales de la machine

Les dimensions et grandeurs principales de la machine d'étude sont présentées dans le **Tableau II.2** ci-dessous.

*Tableau II.2 Dimensions de la machine d'étude*

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Nombre de pôle	<b>2p</b>	<b>4</b>	-
Nombre d'encoche	<b>N<sub>s</sub></b>	<b>24</b>	-
Nombre de spire	<b>N</b>	<b>100</b>	<b>Spire</b>
Rayon extérieur du stator	<b>R<sub>1</sub></b>	<b>247</b>	<b>mm</b>
Rayon intérieur du stator	<b>R<sub>2</sub></b>	<b>147</b>	<b>mm</b>
Rayon extérieur du rotor	<b>R<sub>3</sub></b>	<b>146</b>	<b>mm</b>
Rayon intérieur du rotor	<b>R<sub>4</sub></b>	<b>30</b>	<b>mm</b>
L'épaisseur de l'entrefer	<b>G</b>	<b>1</b>	<b>mm</b>
Hauteur de l'encoche	<b>h<sub>0</sub></b>	<b>50</b>	<b>mm</b>
Ouverture de l'encoche	<b>b<sub>0</sub></b>	<b>10</b>	<b>degré</b>

## II.6.3 Définition du maillage

La méthode des éléments finis repose sur une discrétisation du domaine d'analyse selon un maillage. On a choisi un maillage triangulaire.

Nous avons resserré ce maillage près des endroits d'intérêt (ponts tangentiels, entrefer où entrées des encoches par exemple), par ce qu'on veut connaître l'induction dans l'entrefer et aux ponts tangentiels, et plus le maillage est resserré aux endroits d'intérêt, plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l'équation aux dérivés partielles. [7]

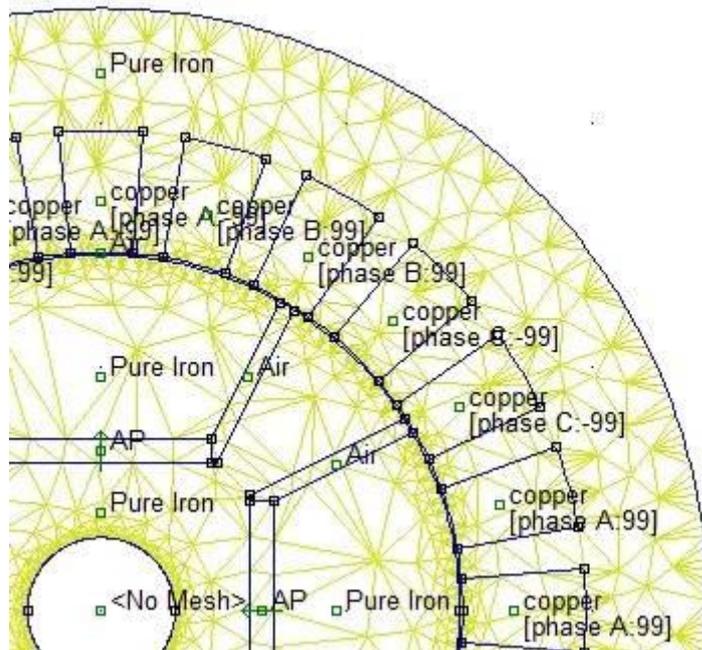


Figure II.4 Extrait du maillage de la machine étudiée

## II.7. Conclusion

Au cours de ce chapitre, on a présenté le modèle bidimensionnel (2D) de la machine étudiée (machine synchrone à aimants enterrés), en utilisant les équations aux dérivées partielles.

Ensuite nous avons présenté les étapes suivies pour la résolution des équations auxquelles on a abouti, ainsi que la description du logiciel de calcul utilisé (FEMM).

Enfin on a présenté la machine d'étude et décrit sa constitution ainsi que ses paramètres géométriques et les régions de la machine, et le maillage par le logiciel.

**CHAPITRE III**  
**DÉTERMINATION ET ANALYSE**  
**DES CARACTÉRISTIQUES**  
**STATIQUES DE LA MACHINE**  
**D'ÉTUDE**

### III.1 Introduction

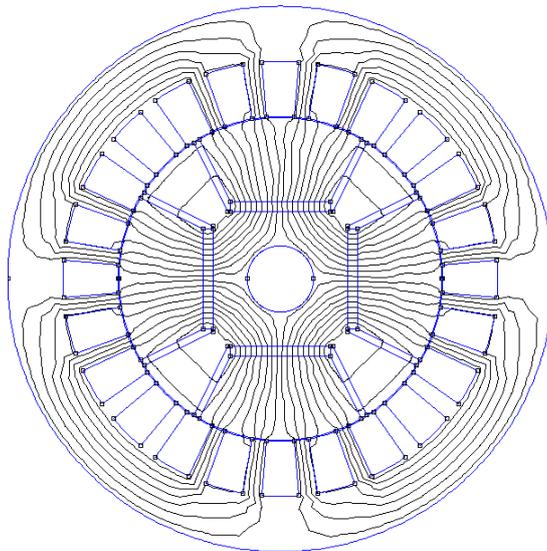
Le fonctionnement des machines électriques est directement lié à la distribution des lignes du champ magnétique au sein de leurs structures. La connaissance de cette distribution permet de déterminer les grandeurs nécessaires à leur dimensionnement comme le flux, le couple électromagnétique, ...etc.

Dans ce présent chapitre nous allons étudier une machine synchrone à aimants permanents enterrés. On déterminera ses caractéristiques statiques (flux, induction, couple de détente) pour différents types d'aimants et en agissant sur leurs dimensions avec la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel FEMM.

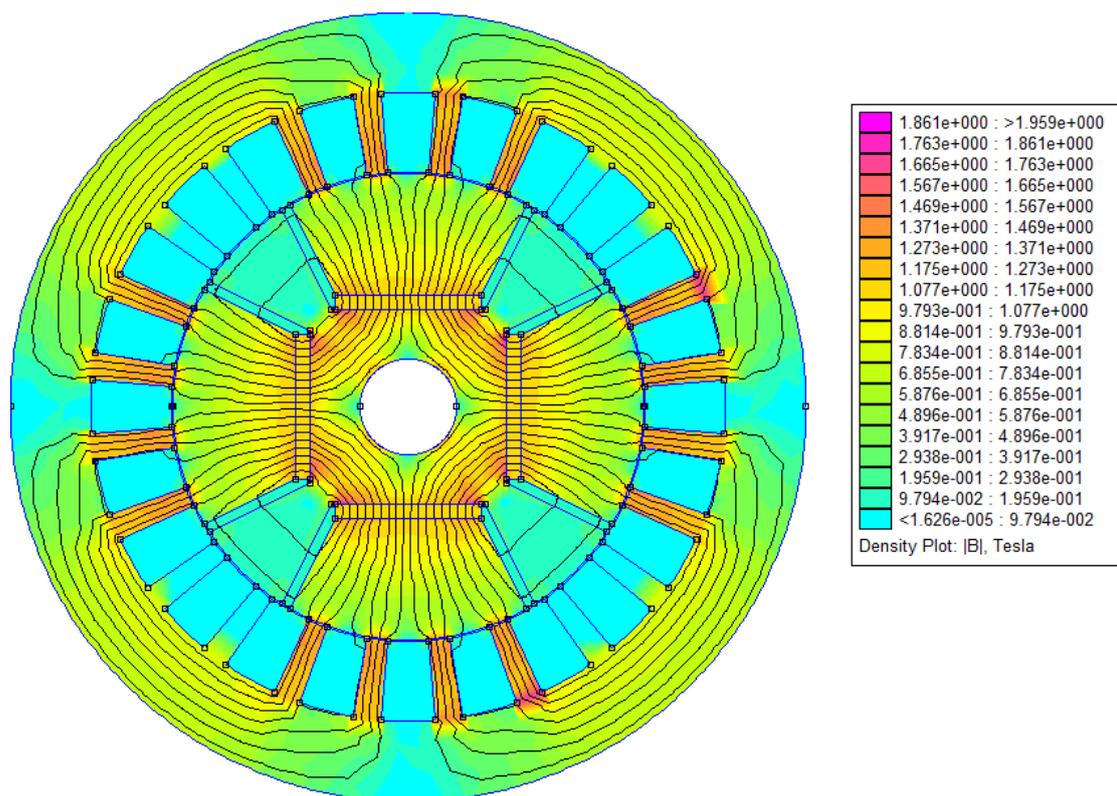
### III.2 Fonctionnement à vide

Le bobinage statorique n'étant pas alimenté, on s'intéresse dans ce cas à l'induction dans l'entrefer, le flux ainsi qu'au couple de la machine en fonctionnement à vide

#### III.2.1 Ligne de flux et carte de l'induction magnétique à vide



*Figure III .1* Configuration des lignes de flux à vide.



*Figure III .2* Carte d'induction magnétique à vide

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

### III.3 Répartition de l'induction magnétique normale, le flux et le couple de détente, pour des différents matériaux autour du rotor

Dans la suite, nous présentons successivement les graphiques illustrant l'induction magnétique normale générée dans l'entrefer, le flux magnétique induit dans les trois phases de la machine, ainsi que le couple de détente de la machine en fonction de la position du rotor. Ces variations sont réalisées en modifiant les matériaux entourant les aimants permanents du rotor.

#### III.3.1. Pour l'air

##### III.3.1.a L'induction magnétique

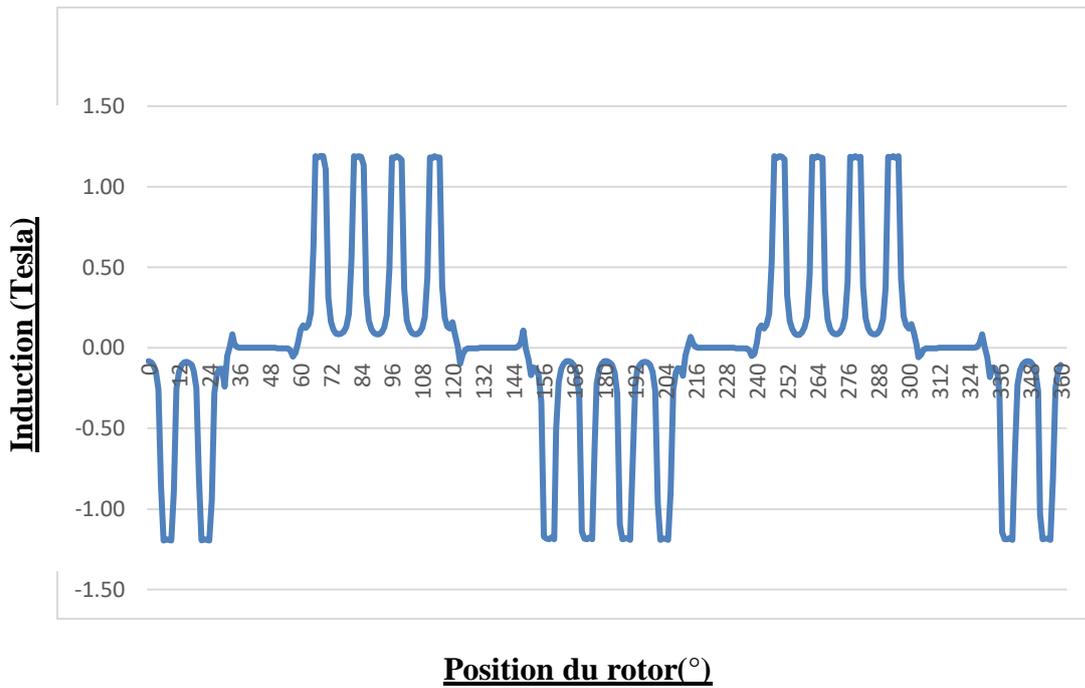
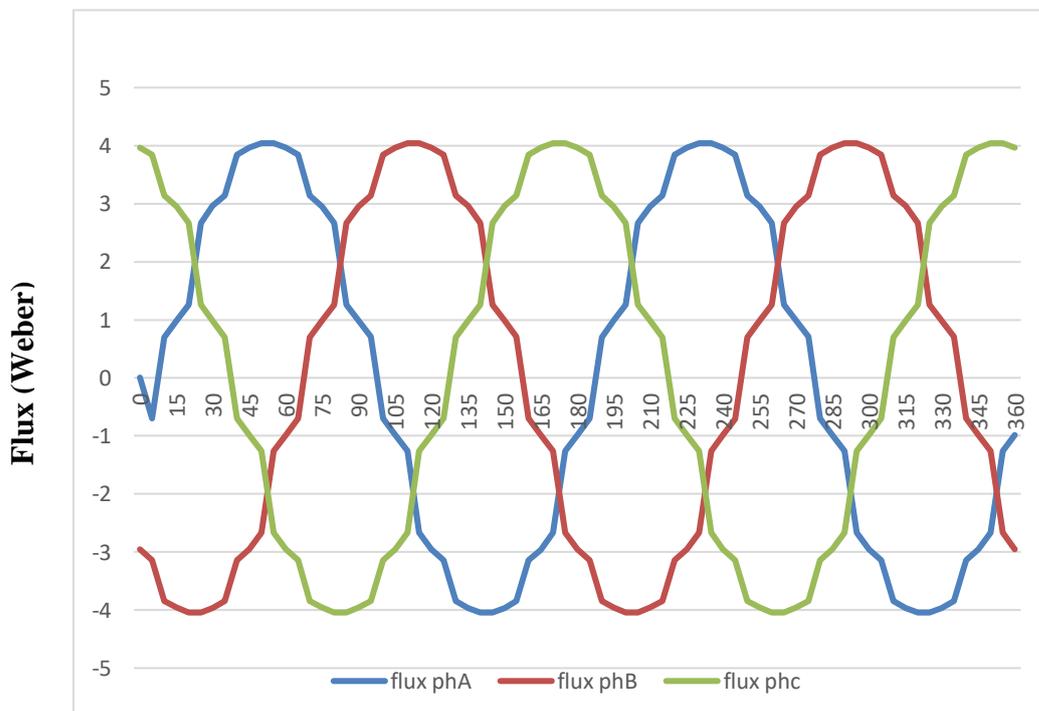


Figure III.3 Distribution spatiale de l'induction magnétique

### III.3.1.b le flux magnétique dans les trois phases.

La figure (III.4) montre les flux engendrés par les aimants permanents dans les trois phases à vide. Les amplitudes des flux sont identiques pour chaque phase, mais déphasés de 120° électrique, en fonction de la position du rotor. Les allures des trois graphes sont proches des sinusoides.



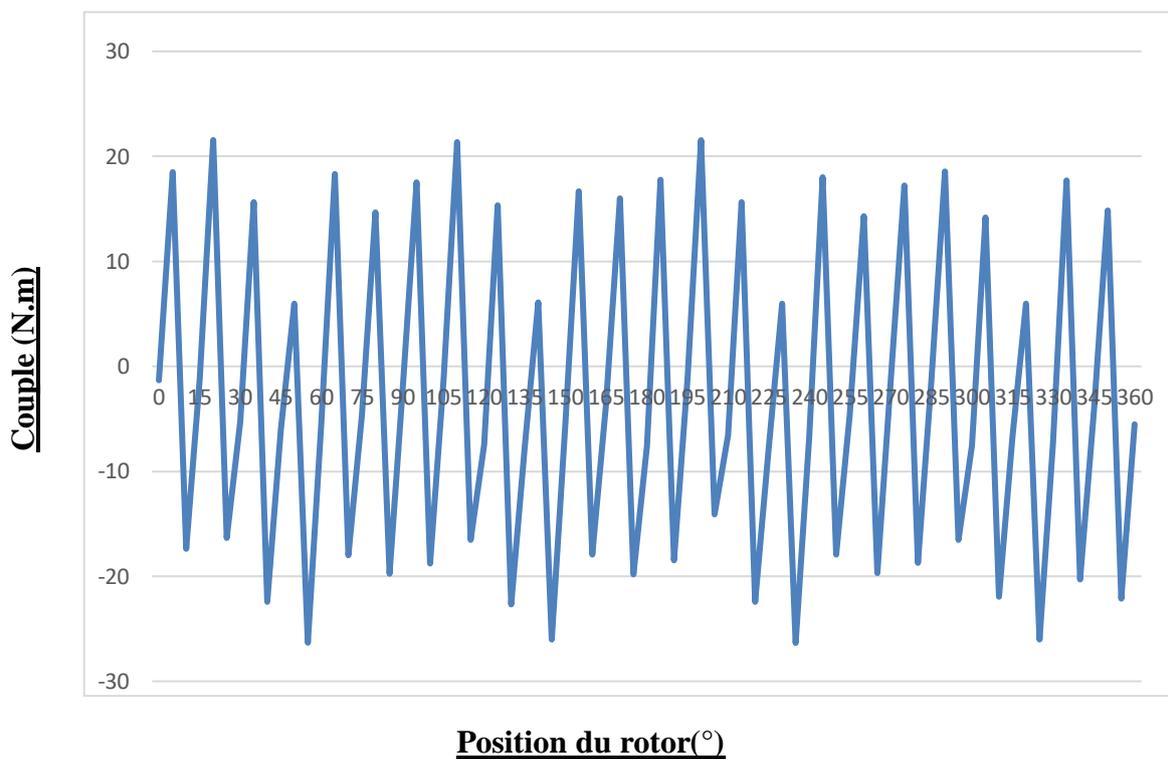
**Position du rotor(°)**

*Figure III.4* Forme d'onde de flux magnétique des trois phases  $I=0$

**III.3.1.c Le couple de détente**

Le couple de détente est le couple maximum qu'il est possible d'appliquer au rotor d'une machine non alimentée et sans provoquer sa rotation.

Le couple de détente peut être déterminé avec la méthode des éléments finis à vide (le courant de charge est nul), pour plusieurs positions du rotor. Pendant la rotation du rotor, la trajectoire du flux des aimants permanents rencontre un entrefer global conduisant à la variation de la coénergie avec cette position. C'est la variation de cette coénergie qui entraîne la création de ce couple appelé « couple de détente ».



*Figure III.5* Evolution de couple de détente

**III.3.2 Remplacement de la région air dans le rotor par un matériau amagnétique aluminium (Al, 6061-T6)**

En remplaçant les régions air séparant les pôles engendrés par les aimants par un matériau amagnétique nous obtenons les graphiques ci-après :

### III.3.2.a Carte de l'induction magnétique

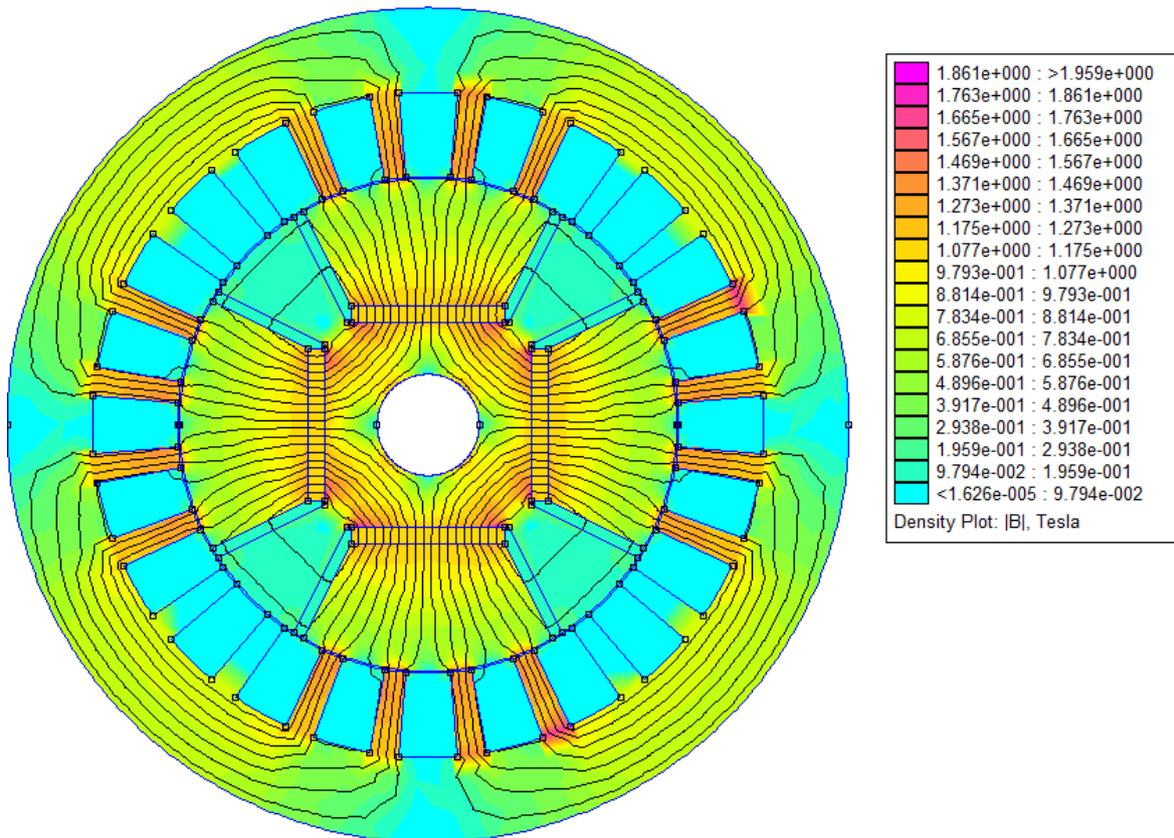


Figure III.6 Carte d'induction magnétique .

Comparée à la figure II.2, nous constatons qu'il n'y a pas de modification de la carte du champ magnétique.

### III.3.2.b. l'induction magnétique

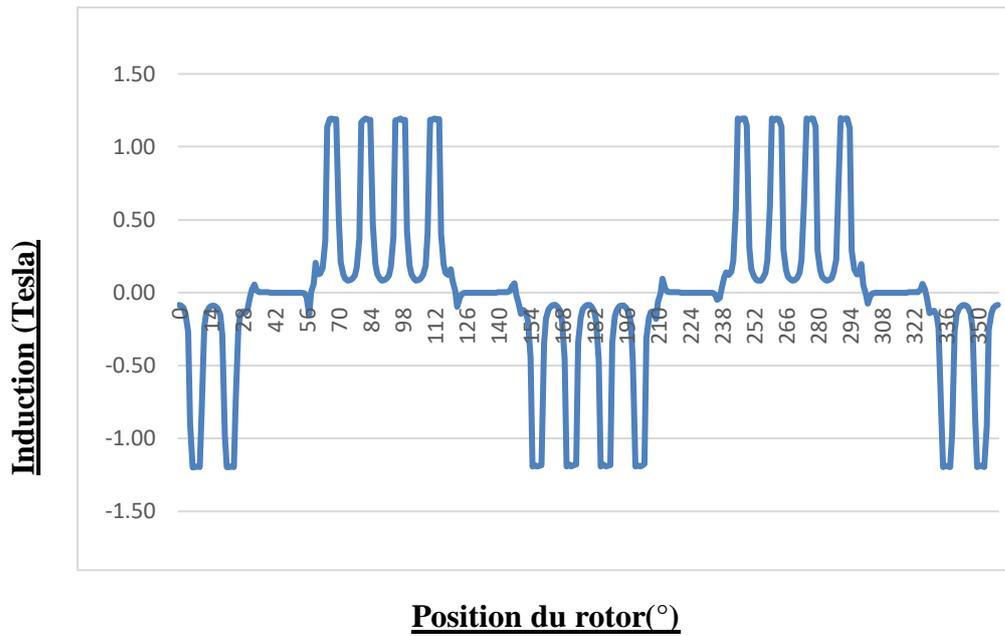


Figure III.7 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique

Comparée à la figure II.3, nous constatons qu'il n'y a pas de modification de la distribution de l'induction magnétique radiale.

### III.3.2.c. le flux

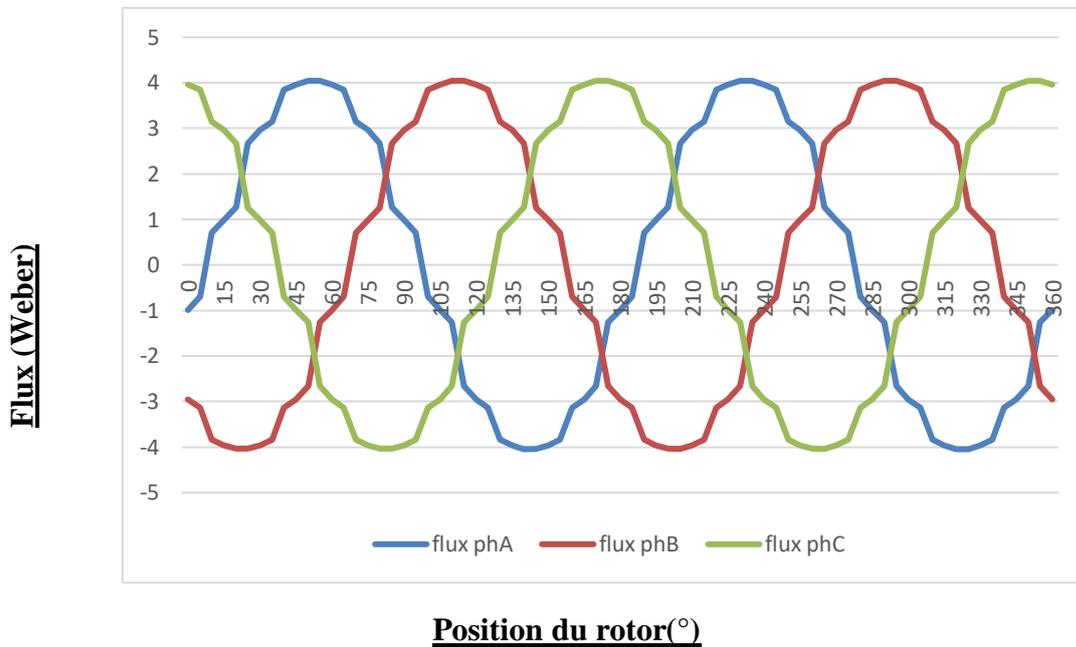


Figure III.8 Forme d'onde du flux magnétique des trois phases  $I=0$

Comparée à la figure II.4, nous constatons que les formes d'onde des flux magnétiques dans les trois phases sont invariables

### III.3.2.d. Le couple de détente

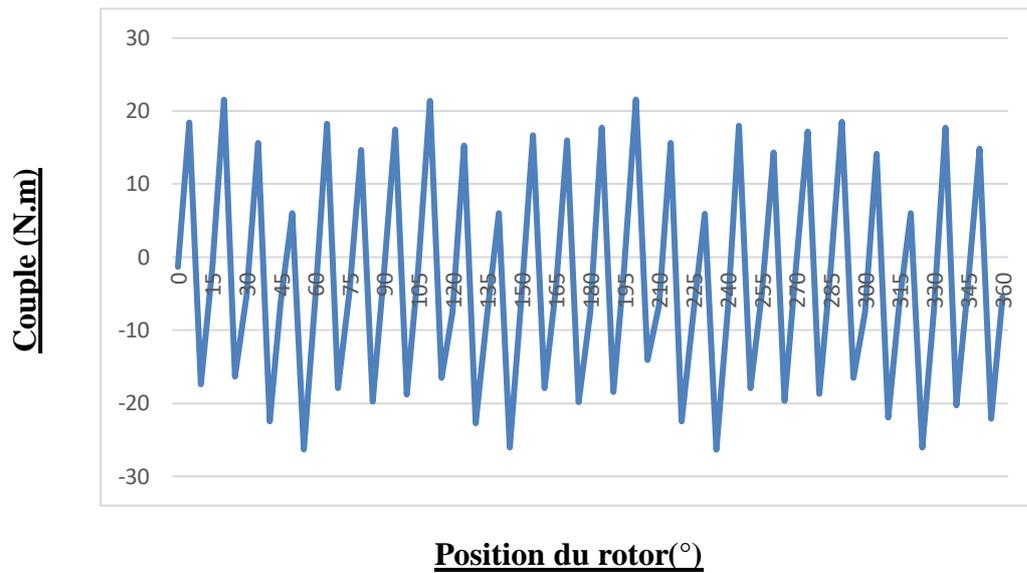


Figure III.9 Couple de détente

Comparée à la figure II.5, nous constatons qu'il n'y a pas de modification de l'allure du couple de détente.

En conclusion, il est possible de constater du point de vue magnétique que l'insertion d'air entre les aimants du rotor, ou son remplacement par un matériau amagnétique tel que l'aluminium, n'apporte aucun changement.

### III.3.3 Remplacement de la région Aluminium dans le rotor par le matériaux Pure Iron.

#### III.3.3.a La carte des lignes de flux magnétique

v .

#### III.3.3.b. La carte de l'induction magnétique

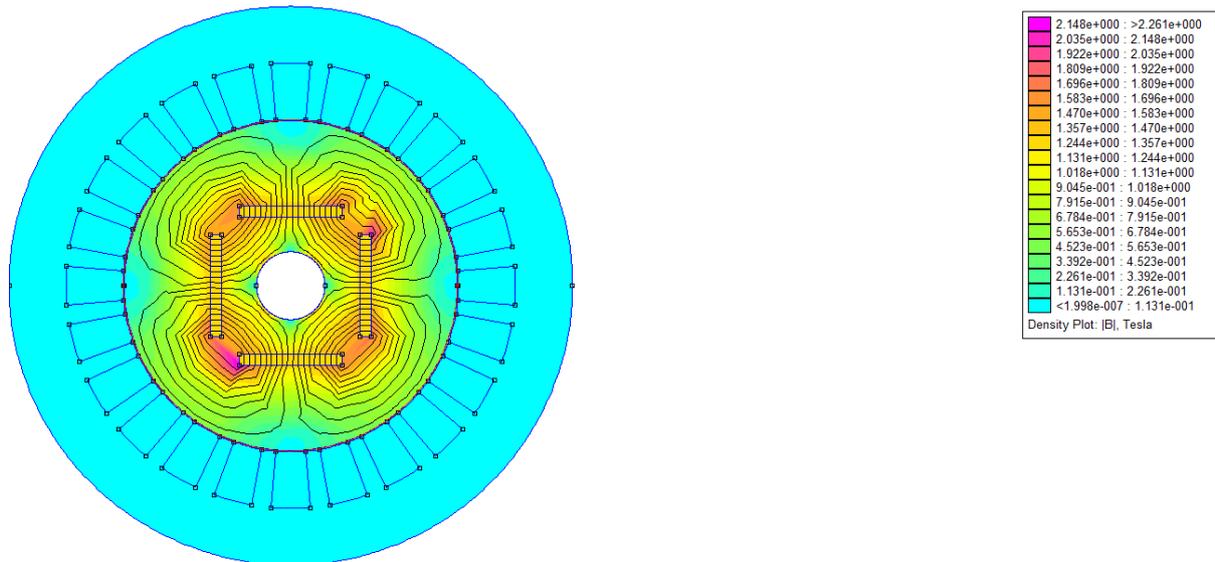


Figure III.11 Carte d'induction magnétique .

Il est clair que la majorité des lignes de champs ne se referment pas, via le stator, en traversant l'entrefer. Elle se ferment dans le rotor. Nous sommes en présence d'un court-circuit magnétique. Les aimants permanents sont assez loin de l'entrefer.

### III.3.3.c. l'induction magnétique

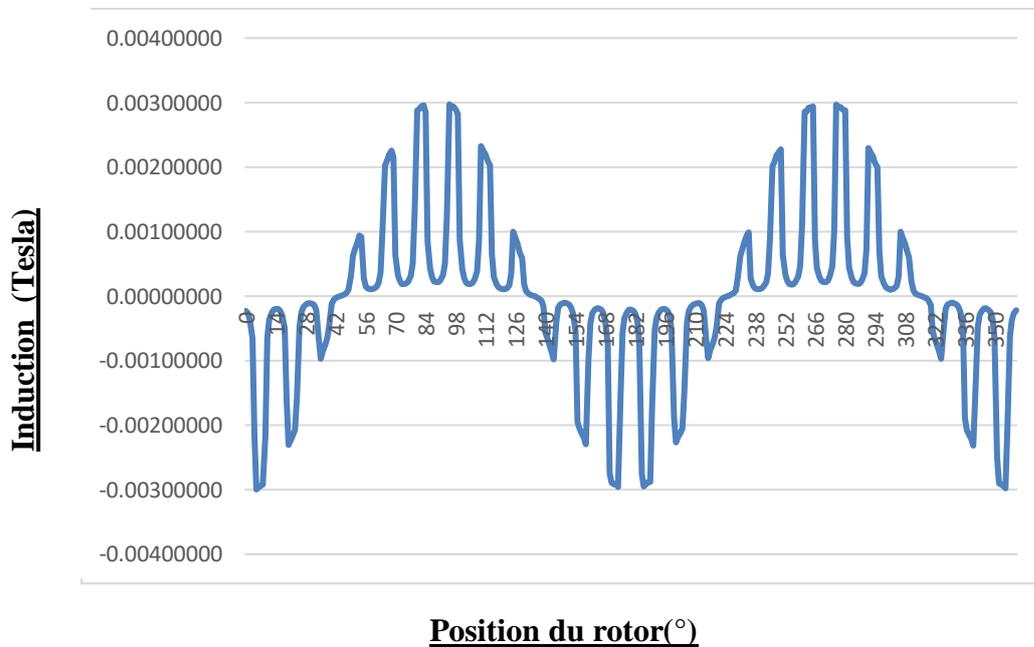


Figure III.12 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique

La valeur max de l'induction magnétique dans l'entrefer ne dépasse pas les 0.003 T.

### III.3.3.d. le flux

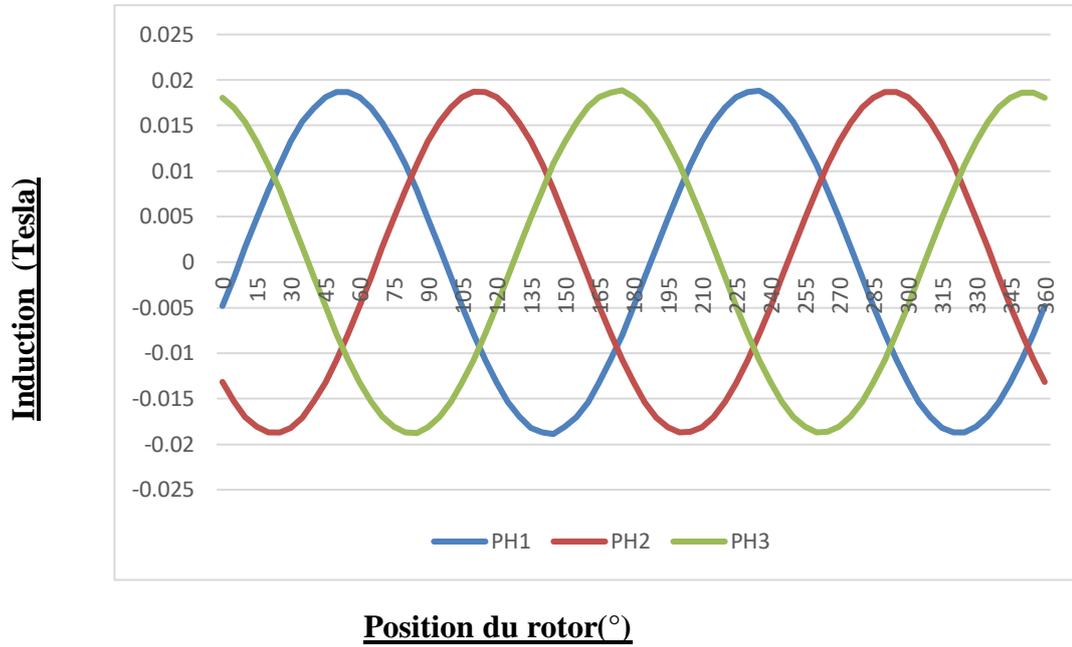
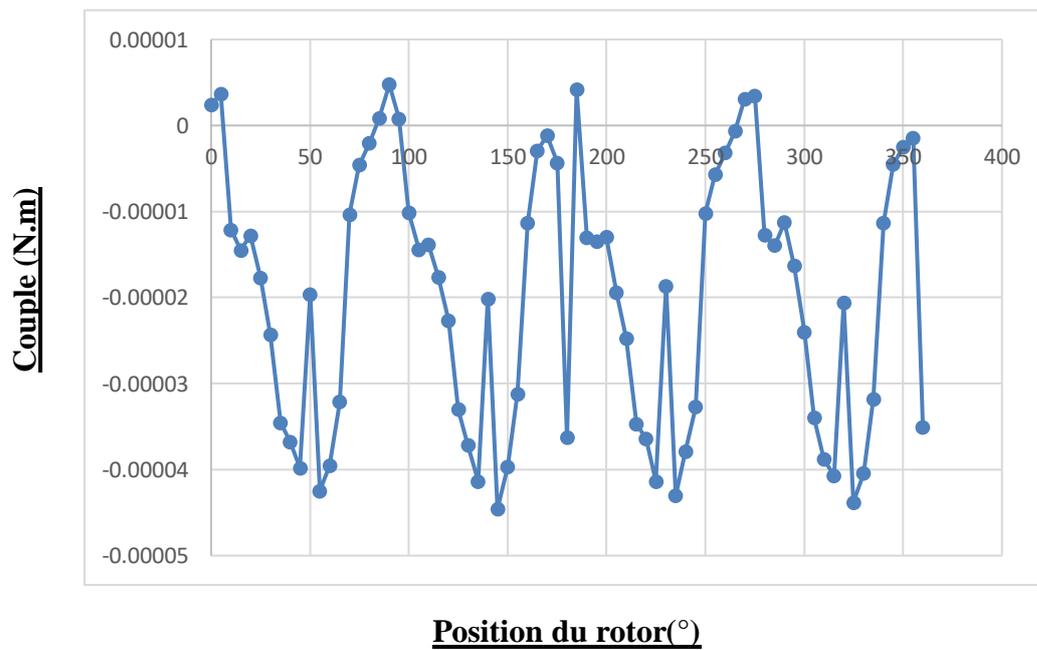


Figure III.13 Forme d'onde du flux magnétique des trois phases  $I=0$

### III.3.3.e. Le couple de détente



**Figure III.14** Couple de détente

### **Interprétations :**

On constate que lorsque le rotor est constitué d'un matériau amagnétique tel que l'aluminium, les lignes de flux magnétique évitent de se fermer dans le rotor et traversent principalement l'entrefer. Car les matériaux amagnétiques ont une perméabilité magnétique très proche de celle de vide, ce qui signifie qu'ils offrent une résistance négligeable au passage des lignes de flux.

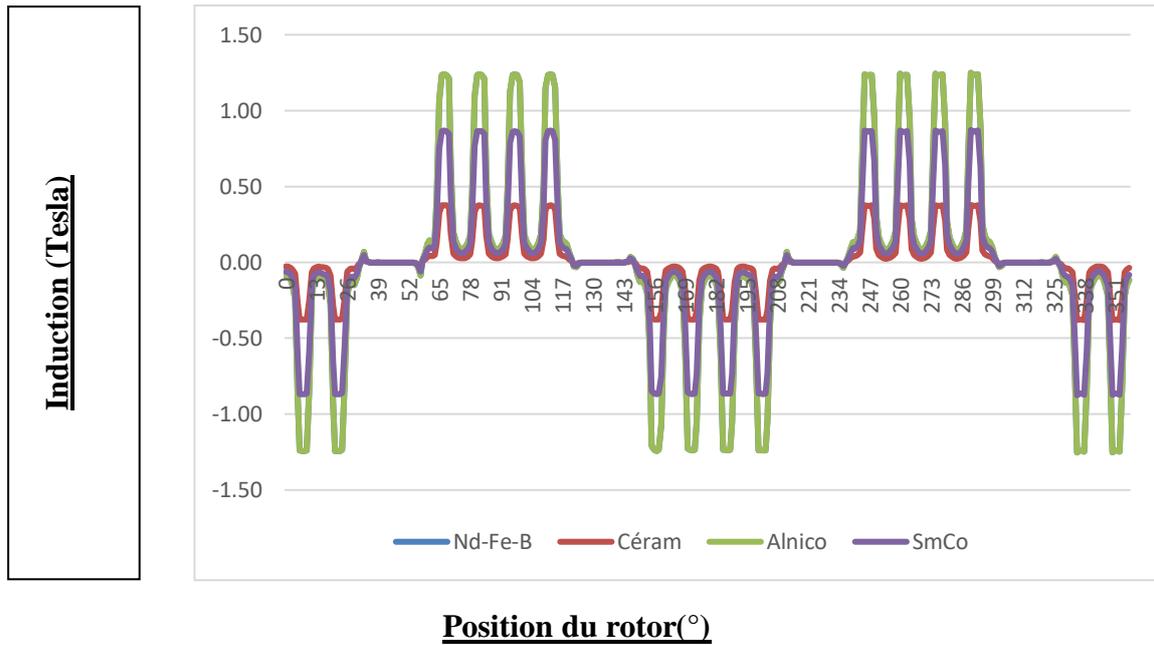
De même lorsque le rotor est constitué du matériau tel que le fer pur (pure iron.), il possède une perméabilité magnétique élevée, cela signifie que le matériau du rotor favorise le passage des lignes de flux magnétique à travers lui-même. En d'autres termes, le matériau ferromagnétique du rotor permet aux lignes de flux de se déplacer plus facilement à travers le rotor.

## **III.4 Influence des paramètres magnétiques et géométriques sur les performances de la machine**

### **III.4.1 Influence de type de l'aimant**

#### **➤ Choix de type de l'aimant**

Les distributions de la composante normale  $B_n$  au milieu de l'entrefer, pour différents types d'aimants permanents sont données par la figure (III.15).



*Figure III.15 Distribution spatiale de l'induction électromagnétique dans l'entrefer pour différents types d'aimants.*

Les amplitudes maximales obtenues pour les aimants de type Nd-Fe-B, Ceramic, Alnico et SmCo (repris de la bibliothèque du logiciel FEMM) sont données par le tableau (III.1)

*Tableau III.1 Des amplitudes des inductions dues aux aimants des différentes positions du rotor.*

Position(°)	Nd-Fe-B	Céram	Alnico	SmCo
0	-0.09	-0.03	-0.09	-0.06
45	0	0	0	0
70	0.62	0.19	0.62	0.44
180	-0.09	-0.03	-0.09	-0.06
335	-1.25	-0.38	-1.25	-0.88

**Interprétation :**

- Le type d'aimant influe sur la valeur maximale de l'induction mais pas sur la largeur d'onde de la grandeur.

- En comparant les amplitudes des inductions dues aux aimants dans le tableau (III.1), on trouve que le (Nd-Fe-B) et l'Alnico ont des performances supérieures par rapport aux autres.

### III.5 Influence de l'épaisseur de l'aimant

Les aimants permanents jouent le rôle des sources essentielles du flux magnétique dans les machines. C'est pourquoi, pour une longueur fixée, le choix de l'épaisseur des aimants, donc leur volume peut agir fortement sur l'amélioration des performances de la machine.

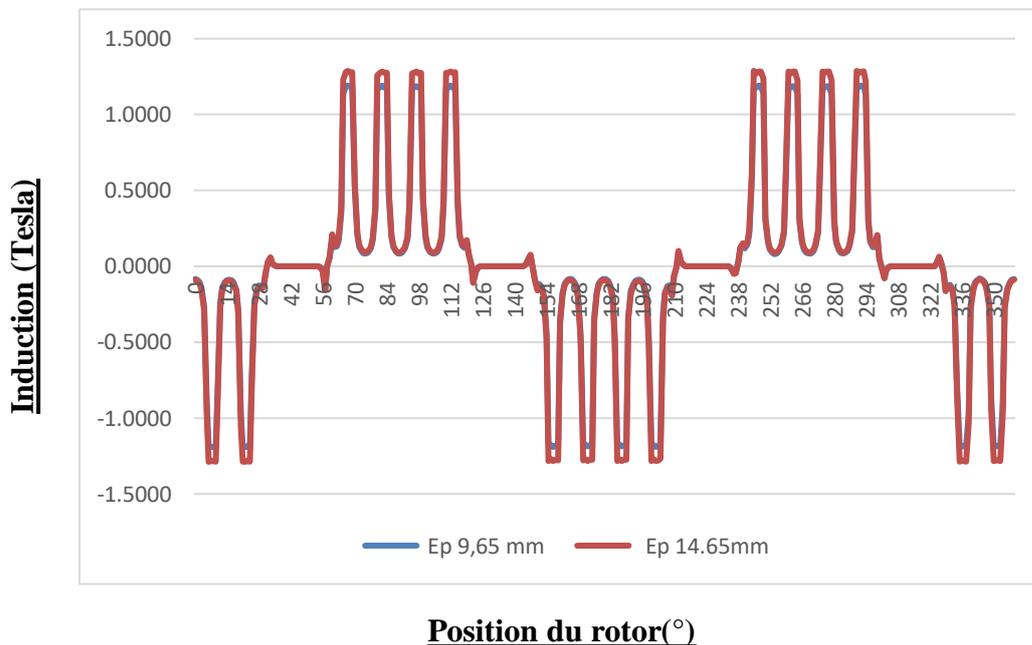
On prend deux dimensions différentes pour le même aimant (Nd-Fe-B), comme présentées sur le tableau(III.2)

**Tableau III.2** Les dimensions des épaisseurs de l'aimant.

Type d'aimants	Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)
Nd-Fe-B	9.65	14.65

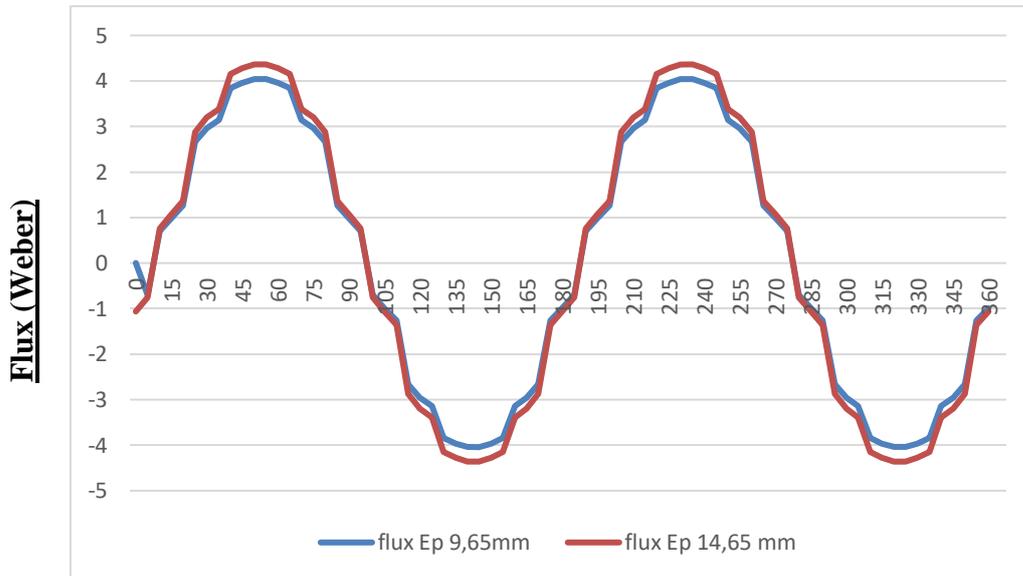
Dans cette partie, on présentera les résultats de simulation de quelques grandeurs magnétiques de la machine telles que l'induction, le flux et le couple de détente.

#### III.5.1 La répartition de l'induction magnétique



**Figure III.16** Distribution spéciale de l'induction électromagnétique dans les différentes épaisseurs d'aimant

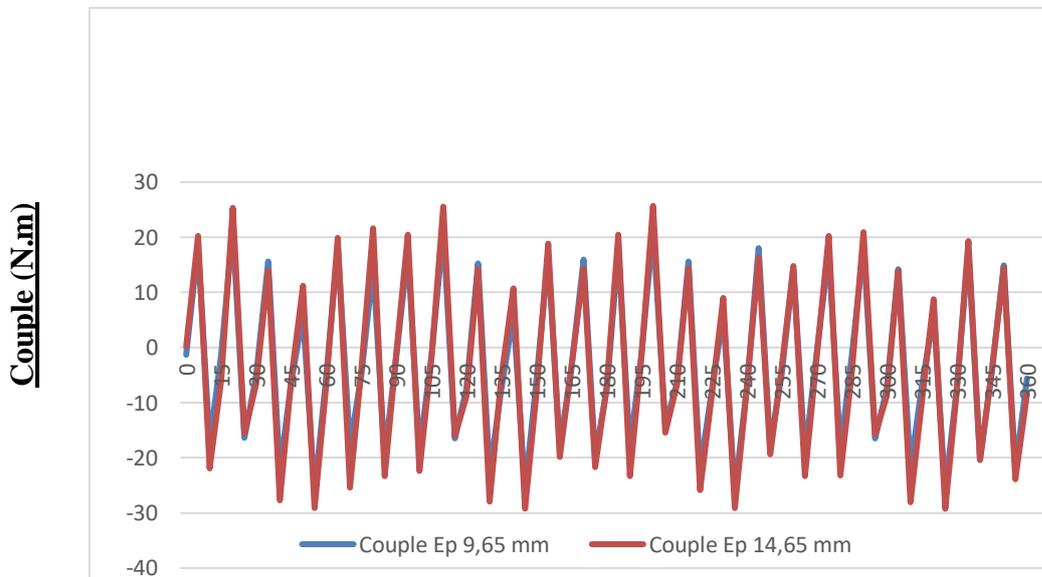
### III.5.2 le flux



Position du rotor(°)

Figure III.17 Forme d'onde du flux magnétique de la phase 1 pour les deux épaisseurs de l'aimant

### III.5.3 Le couple de détente.



Position du rotor(°)

Figure III.18 Couple détente de la phase 1 pour les deux épaisseurs de l'aimant.

### **Interprétations :**

- Les caractéristiques de flux sont modifiées avec la variation de l'épaisseur de l'aimant, à chaque fois que l'épaisseur augmente l'amplitude de la composante normale de l'induction magnétique dans l'entrefer augmente entraînant l'augmentation du flux magnétique engendré dans les 3 phases de la machine.
- On remarque aussi que l'amplitude du couple de détente augmente quand l'épaisseur est plus grande.

Nous trouvons que l'épaisseur de l'aimant fait varier significativement les performances de la machine .L'augmentation des épaisseurs des aimants permanents enterrés améliorent ses performances en termes de couple de détente et de flux.

### **III.6 Conclusion**

Les résultats de simulation nous ont permis de nous rendre compte de l'état magnétique de la machine .Nous avons fait le constat sur l'influence de type d'aimant utilisé ainsi que son épaisseur, qui jouent un rôle prépondérant sur les caractéristiques de la machine.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## Conclusion générale

Ce travail est consacré à la modélisation électromagnétique de la machine synchrone à aimants permanents enterrés à 2 paires de pôles, possédant quatre (04) aimants au rotor et 24 encoches au stator en utilisant la méthode des éléments finis.

Nous avons présenté la machine synchrone à aimants permanents et ces diverses formes, après avoir défini les différents types d'aimants.

Ensuite, nous avons choisi un modèle électromagnétique basé sur les équations de Maxwell en adoptant une formulation en potentiel vecteur, bidimensionnel dans le cas magnétostatique.

Cette modélisation a été réalisée à l'aide d'un programme en langage LUA qui décrit la géométrie d'étude, en prenant en compte les différentes propriétés des matériaux composant les différentes parties de la machine, ainsi que les conditions aux limites, qui ont été de type Dirichlet appliquées sur la limite externe de la machine.

Un logiciel de calcul par éléments finis (FEMM) a été utilisé en raison de sa simplicité. La structure de la machine a été définie en deux dimensions sous forme graphique.

Le travail de modélisation électromagnétique de la machine synchrone à aimants permanents a permis de mettre en évidence l'influence du type d'aimant et de l'épaisseur de l'aimant sur les grandeurs magnétiques.

Les résultats obtenus démontrent ce qui suit :

- Le type d'aimant a une influence sur la valeur maximale de la grandeur magnétique caractérisant la machine (induction, flux, couple de détente.)
- Que l'insertion d'air entre les aimants du rotor, ou son remplacement par un matériau amagnétique tel que l'aluminium, n'apporte aucun changement du point de vue magnétique.
- L'épaisseur de l'aimant influe sur la valeur maximale de l'induction. Nous avons constaté que l'amplitude de l'induction est proportionnelle à l'épaisseur des aimants.

Il reste des perspectives intéressantes à explorer pour approfondir cette étude. Voici quelques pistes possibles :

1. Analyser d'autres configurations de machines synchrones à aimants permanents, en variant le nombre de paires de pôles, le nombre d'aimants au rotor ou la géométrie des encoches au stator. Cela permettrait de mieux comprendre l'impact de ces paramètres sur les performances électromagnétiques de la machine.
2. Étudier l'influence d'autres facteurs, tels que la température, sur les propriétés magnétiques de la machine. La modélisation et l'analyse de ces effets thermiques pourraient conduire à une meilleure compréhension des performances réelles de la machine dans des conditions de fonctionnement variables.
3. Optimiser la conception de la machine en utilisant des algorithmes d'optimisation pour trouver la configuration optimale des aimants, des encoches et des matériaux. Cela permettrait de maximiser l'efficacité et les performances globales de la machine.

## Références bibliographiques

- [1] : Sahli Arab, Ourari Loucif, Réglage et contrôle de la vitesse de la machine synchrone à aimants permanents, thèse de Master, Université de Bejaia ,2015.
- [2] : Ladghem chikouche Brahim, Pré-dimensionnement des machines synchrones à entrefer lisse et à aimants montés sur la surface rotorique, thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Octobre 2018.
- [3] : K.Malick, Etat de l'art et topologie des machines électriques utilisées dans les voitures électriques, Juillet 2018, Nancy, France.
- [4] : Maarouk Abdelatif, Commande dynamique d'une machine synchrone à aimants permanents alimentée en tension, thèse de Master, Université de Boumerdes, Juin 2016.
- [5] : Abdellaoui Hassina, Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variable électrique, mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de mouloud Maameri Tizi-ouzou.
- [6] : Jawad Ahmed Farooq, Etude du problème inverse en électromagnétique en vue de localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents, thèse de Doctorat, Université Belfort – Montbéliard ,5 Décembre 2008.
- [7] : Mehdioui billel, Lounis Lamine, Etude d'une machine synchrone à aimants permanents à concentration de flux et à bobinage fractionnaire, thèse de Master, Université de Bejaia ,2020.
- [8] :S.Gomez Palleja, Méthode de résolution du modèle analytique magnétique des machines synchrones, projet fin d'étude, ETSEIB, Juillet 2014.
- [9]:T.Heikkila, Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications-analyze and design, Doctor Thesis, Lappeenranta University, Finland, 2002.
- [10]:E.L.Carnilo Arroyo, Modelling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system, Master thesis, university Puerto Rico, 2006.
- [11]:T.G.Wilson, P.H Trikey, D.C machine with solid state commutation, AIEE paper #CP62-1372, October 7, 1962.
- [12]:J.Puraneu,,Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control application: comparative study, thesis of the degree of doctor of sciences(technology),Alta university Lappeenranta ,Finland ,December ,2006.
- [13]:L.Alia, N.Hassani, Classification des machines à aimants permanents, mémoire DEUA, université de Bejaia ,2006.

- [14] : Abdelhakim tlemssani, Contribution à l'application des commandes adaptives par les systèmes floue à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série, janvier 2006.
- [15] :S.Hammache, Dj.Ghemri, Modélisation par éléments finis d'une machine synchrone à aimants permanents, mémoire d'ingénieurs, université de Bejaïa.
- [16] :L.Gasc, Conception d'un actionneur à aimants permanents à faible ondulation de couple pour assistance de direction automobile : approche par la structure et par la commande, thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, novembre 2004.
- [17] : Y. Boutora, Calcul d'une BDCM excitée par les aimants à aimantation parallèle, mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzo ,2000.
- [18] :G.Lacroux, Les aimants permanents, Edition Technique et Documentation, 1989.
- [19] : Ounadi Mohammed, Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents, mémoire d'ingénieur, université Mouloud Mammeri Tizi ouzou.
- [20] : Bouchareb Ilhem, Modélisation et simulation des défauts d'une machine synchrone à réluctance variable, Magister, université de Constantine, 2009.
- [21] : Amarouche Messipssa, Etude et optimisation des machines électriques à double excitation.

## Annexes

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

xcl=0;
ycl=0;
Xc={}
Yc={}
Xc[1]=xcl      Yc[1]=ycl
mi_addblocklabel( Xc[1], Yc[1])
mi_selectlabel(Xc[1],Yc[1])
mi_setblockprop("<No Mesh>",0,auto, 'None', 0, 0, 'None')
mi_clearselected()
--rotor externe
xrel=146; xre2=-146;
yrel=0; yre2=0;
Xre={}
Yre={}
Xre[1]=xrel      Yre[1]=yrel
Xre[2]=xre2      Yre[2]=yre2
for i=1,2 do
mi_addnode( Xre[i],Yre[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(Xre[i],Yre[i])
mi_setnodeprop("None",33)
end
mi_addarc( Xre[1],Yre[1], Xre[2],Yre[2],180,2)
```

```

mi_addarc( Xre[1],Yre[1], Xre[2],Yre[2],180,2)
mi_selectarcsegment(Xre[1],Yre[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 33)
mi_addarc( Xre[2],Yre[2], Xre[1],Yre[1],180,2)
mi_selectarcsegment(Yre[1],Xre[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 33)
--Fin Cercle entrefer

----- Coordonnées de l'espace d'air en contact avec les aimants
yraai1=70.205;xraai1=-45;
yraai2=126.44; xraai2=-73;
yraai3=60.555;xraai3=-47.5;
yraai4=123.135; xraai4=-78.4457;
yraai5=70.205;xraai5=45;
yraai6=126.44; xraai6=73;
yraai7=60.555;xraai7=47.5;
yraai8=123.135; xraai8=78.4457;
-----Coordonnées des aimants
xap1=45; yap1=60.555
xap2=-45; yap2=60.555

xraai={}
yraai={}
xraai[1]=xraai1 ; yraai[1]=yraai1

xraai[1]=xraai1 ; yraai[1]=yraai1
xraai[2]=xraai2 ; yraai[2]=yraai2
xraai[3]=xraai3 ; yraai[3]=yraai3
xraai[4]=xraai4 ; yraai[4]=yraai4
xraai[5]=xraai5 ; yraai[5]=yraai5
xraai[6]=xraai6 ; yraai[6]=yraai6
xraai[7]=xraai7 ; yraai[7]=yraai7
xraai[8]=xraai8 ; yraai[8]=yraai8
xraai[9]=xap1 ; yraai[9]=yap1
xraai[10]=xap2 ; yraai[10]=yap2

for i=1,10 do
mi_addnode( xraai[i],yraai[i] )
end
for i=1,10 do
mi_selectnode(xraai[i],yraai[i])
mi_setnodeprop("None",3)
end
mi_addsegment(xraai[1],yraai[1], xraai[2],yraai[2])
mi_addsegment(xraai[3],yraai[3], xraai[4],yraai[4])

mi_addsegment(xraai[5],yraai[5], xraai[6],yraai[6])
mi_addsegment(xraai[7],yraai[7], xraai[8],yraai[8])

```

```

mi_addsegment(xraai[7],yraai[7], xraai[8],yraai[8])

mi_addsegment(xraai[5],yraai[5], xraai[9],yraai[9])
mi_addsegment(xraai[1],yraai[1], xraai[10],yraai[10])

mi_addsegment(xraai[1],yraai[1], xraai[5],yraai[5])
mi_addsegment(xraai[3],yraai[3], xraai[7],yraai[7])

mi_selectsegment(xraai[2],yraai[2])
mi_selectsegment(xraai[4],yraai[4])
mi_selectsegment(xraai[6],yraai[6])
mi_selectsegment(xraai[7],yraai[7])
mi_setsegmentprop('None', 0, automesh, 0, 3)

-- Attribution région air autour des aimants.

xair1=60 yair1=96
xair2=-60 yair2=96
xfer=0 yfer=96
Xair={}
Yair={}
Xair[1]=xair1      Yair[1]=yair1
Xair[2]=xair2      Yair[2]=yair2

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

----- segments des aimants
mi_selectsegment(xraai[1],(yraai[1]+yraai[10])/2)
mi_selectsegment(xraai[5],(yraai[5]+yraai[9])/2)
mi_selectsegment((xraai[3]+xraai[10])/2,yraai[3])
mi_selectsegment((xraai[9]+xraai[10])/2,yraai[9])
mi_selectsegment((xraai[7]+xraai[9])/2,yraai[7])
mi_selectsegment((xraai[1]+xraai[5])/2,yraai[1])

mi_setsegmentprop('None', 0, automesh, 0, 3)
mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 90, 3, 4)

```

```

mi_copyrotate(0, 0, 90, 3, 4)
--*****
---arbre du rotor
xri1=30;xri2=-30;
yri1=0;yri2=0;
Xri={}
Yri={}
Xri[1]=xri1      Yri[1]=yri1
Xri[2]=xri2      Yri[2]=yri2
for i=1,2 do
mi_addnode( Xri[i],Yri[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(Xri[i],Yri[i])
mi_setnodeprop("zero",2)
end
mi_addarc( Xri[1],Yri[1], Xri[2],Yri[2],180,2)
mi_selectarcsegment(Xri[1],Yri[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 2)
mi_addarc( Xri[2],Yri[2], Xri[1],Yri[1],180,2)
mi_selectarcsegment(Yri[1],Xri[2])
mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 2)
--Fin

---Cercle culasse stator

mi_clearselected()
xri1=138.135;xri2=185.119;xri3=144.767;xri4=194.007;
yri1=50.277;yri2=67.378;yri3=25.5263;yri4=34.2087;
Xri={}
Yri={}
Xri[1]=xri1      Yri[1]=yri1
Xri[2]=xri2      Yri[2]=yri2
Xri[3]=xri3      Yri[3]=yri3
Xri[4]=xri4      Yri[4]=yri4
for i=1,4 do
mi_addnode( Xri[i],Yri[i] )
end
for i=1,4 do
mi_selectnode(Xri[i],Yri[i])
mi_setnodeprop("None",1)
end
mi_addsegment(Xri[1],Yri[1], Xri[2],Yri[2])
mi_addsegment(Xri[3],Yri[3], Xri[4],Yri[4])
mi_addarc( Xri[4],Yri[4], Xri[2],Yri[2],10,1)
mi_selectsegment(Xri[4],Yri[4])
mi_selectsegment(Xri[1],Yri[1])

```

```

mi_selectsegment(Xri[1],Yri[1])
mi_setsegmentprop('None', 0, automesh, 0, 1)
mi_selectarcsegment(Xri[4],Yri[4])
mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 1)
mi_clearselected()
mi_selectgroup(1)
mi_copyrotate(0, 0, 15, 23, 4)

-- Rayon interne du stator
xcui1=147;xcui2=-147;
ycui1=0;ycui2=0;
Xcui={}
Ycui={}
Xcui[1]=xcui1      Ycui[1]=ycui1
Xcui[2]=xcui2      Ycui[2]=ycui2
for i=1,2 do
mi_addnode( Xcui[i],Ycui[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(Xcui[i],Ycui[i])
mi_setnodeprop("None",1)
end
mi_addarc( Xcui[1],Ycui[1], Xcui[2],Ycui[2],180,2)
--mi_selectarcsegment(Xcui[1],Ycui[1])

mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 1)

--      Integration des aimants
--xrah1=60.555;xrah2=123.135;xrah3=70.205;xrah4=126.44;
--yrah1=47.5;yrah2=78.4455;yrah3=45;yrah4=73;

--xrah={}
--yrah={}
--xrah[1]=xrah1 yrah[1]=yrah1
--xrah[2]=xrah2 yrah[2]=yrah2
--xrah[3]=xrah3 yrah[3]=yrah3
--xrah[4]=xrah4 yrah[4]=yrah4
--for i=1,4do
--mi_addnode( xrah[i],yrah[i] )
--end
--for i=1,4 do
--mi_selectnode(xrah[i],yrah[i])
--mi_setnodeprop("None",3)
--end
--mi_addsegment(xrah[1],yrah[1], xrah[2],yrah[2])
--mi_addsegment(xrah[3],yrah[3], xrah[4],yrah[4])

--mi_selectsegment(xrah[1],yrah[2])
--mi_selectsegment(xrah[4],yrah[4])
--mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 3)

```

```

--mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 1)
mi_addarc( Xcui[2],Ycui[2], Xcui[1],Ycui[1],180,2)
--mi_selectarcsegment(Ycui[1],Xcui[2])
--mi_setarcsegmentprop(1, 'None', 0, 1)
--Fin Rayon interne du stator
--fin
-----Rayon externe du STATOR Avec condition de dirichlet à la frontière
xreA1= 247;xreA2=-247;
yre1=0;yreA2=0;
XreA={}
YreA={}
XreA[1]=xreA1 YreA[1]=yreA1
XreA[2]=xreA2 YreA[2]=yreA2
for i=1,2 do
mi_addnode( XreA[i],YreA[i] )
end
for i=1,2 do
mi_selectnode(XreA[i],YreA[i])
mi_setnodeprop("zero",1)
end
mi_addarc( XreA[1],YreA[1], XreA[2],YreA[2],180,1)
mi_selectarcsegment(YreA[1],XreA[1])
mi_setarcsegmentprop(1, 'zero', 0, 1)
mi_addarc( XreA[2],YreA[2], XreA[1],YreA[1],180,1)
mi_selectarcsegment(YreA[1],XreA[2])

--mi_setsegmentprop('None', 0, automesh, 0, 3)
--mi_selectgroup(3)
--mi_copyrotate(0, 0, 90, 3, 4)

-----Aimants -----

--Remplire les aimants du rotor interne
xari1=65.3788;
xari2=0;
yari1=0;
yari2=65.3788;
Xari={}
Yari={}
Xari[1]=xari1 Yari[1]=yari1
Xari[2]=xari2 Yari[2]=yari2
mi_addblocklabel( Xari[1], Yari[1])
mi_selectlabel(Xari[1],Yari[1])
mi_setblockprop("AP",0,auto, 'None', 180, 3, 'None')
mi_selectgroup(3)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 1, 2)

mi_addblocklabel( Xari[2], Yari[2])
mi_selectlabel(Xari[2],Yari[2])
mi_setblockprop("AP",0,auto, 'None', 90, 3, 'None')
mi_selectgroup(3)

```

```

mi_copyrotate(0, 0, -180, 1, 2)
--
mi_clearselected()
----- Remplissage des encoches -----
-----"REPLISSAGE PHASE1 "-----
-- q encoches aller phase 1
N=99
xenc1=167.725;
yenc1=0;
xenc2=162.01 ;
yenc2=43.4107;
Xenc={}
Yenc={}
Xenc[1]=xenc1      Yenc[1]=yenc1
Xenc[2]=xenc2      Yenc[2]=yenc2
for i=1,2 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,auto, "phase A", "none", 4, N)
end
mi_selectgroup(4)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

-- q encoches retour phase 1
xenc3=0;
yenc3=167.725;
yenc4=162.01 ;
xenc4=-43.4107;
Xenc[3]=xenc3      Yenc[3]=yenc3
Xenc[4]=xenc4      Yenc[4]=yenc4
for i=3,4 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,auto, "phase A", "none", 5, -N)
end
mi_selectgroup(5)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

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

-----q encoches aller phase 2 -----
xenc6=83.8624 ;
yenc6=145.254;
xenc7=43.4017 ;
yenc7=162.01;

```

```

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

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

----- q enconches retours phase 2
xenc8= -145.204;
yenc8=83.8624;
xenc9=-162.01 ;
yenc9=43.4107;
Xenc[8]=xenc8      Yenc[8]=yenc8
Xenc[9]=xenc9      Yenc[9]=yenc9
for i=8,9 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,auto, "phase B", "none", 7, -N)

end
mi_selectgroup(7)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

mi_clearselected()

----- fin remplissage de la phase 2

-----"REPLISSAGE PHASE 3 "-----
-----q enconches retour phase 3 -----
xenc10=145.254;
yenc10=83.8629 ;
xenc11=118.599 ;
yenc11=118.599;

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

for i=10,11 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,auto, "phase C", "none", 8, -N)
end
mi_selectgroup(8)

```

```

mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

----- q encoches aller phase 3
xenc12=-83.8629;
yenc12=145.254;
xenc13=-118.599 ;
yenc13=118.599;
Xenc[12]=xenc12      Yenc[12]=yenc12
Xenc[13]=xenc13      Yenc[13]=yenc13
for i=12,13 do
mi_addblocklabel( Xenc[i], Yenc[i])
mi_selectlabel(Xenc[i],Yenc[i])
mi_setblockprop("copper",0,auto, "phase C", "none", 9, N)
end
mi_selectgroup(9)
mi_copyrotate(0, 0, 180, 14, 2)

mi_clearselected()

----- fin remplissage de la phase 3
mi_clearselected()
-----Entrefer et fer du rotor*****
-- entrefer

xe=0;
ye=146.5;
Xe={}
Ye={}
Xe[1]=xe      Ye[1]=ye
mi_addblocklabel( Xe[1], Ye[1])
mi_selectlabel(Xe[1],Ye[1])
mi_setblockprop("Air",0,0.5, 'None',0 , 0, 'None')
mi_clearselected()
-- fer du rotor
xsr=0;
ysr=40;
xss=0;
yss=220;
Xs={}
Ys={}
Xs[1]=xsr Ys[1]=ysr
Xs[2]=xss Ys[2]=yss
for i=1,2 do
mi_addblocklabel( Xs[i], Ys[i])
mi_selectlabel(Xs[i],Ys[i])
mi_setblockprop("Pure Iron",0,auto, 'None',0 , 0, 'None')
end
--Fin Cercle entrefer
--fin de la géométrie--

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

-- flux linkage of phase A

```

```

x1,x2,x3,x4,flux_phase_A,x6 = mo_getcircuitproperties("phase A");
-- flux linkage of phase B
x1,x2,x3,x4,flux_phase_B,x6 = mo_getcircuitproperties("phase B");
-- flux linkage of phase C
x1,x2,x3,x4,flux_phase_C,x6 = mo_getcircuitproperties("phase C");
handle = openfile("flux_link_A.txt","a")
write(handle,deg," \t",flux_phase_A," ", "\n")
closefile(handle)
handle = openfile("flux_link_B.txt","a")
write(handle,deg," \t",flux_phase_B," ", "\n")
closefile(handle)
handle = openfile("flux_link_C.txt","a")
write(handle,deg," \t",flux_phase_C," ", "\n")
closefile(handle)
-----
x4=146.5
y4=0
-- couple de détente par contour integral
    mo_selectpoint(x4,y4)
    mo_addcontour(-x4,-y4)
    mo_bendcontour(-180,0.5)
    mo_addcontour(x4,y4)
    mo_bendcontour(-180,0.5)
    torq_det = mo_lineintegral(4)
    mo_clearcontour()

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

```

---

## **Résumé**

L'étude qui sera présentée dans ce mémoire porte sur le calcul numérique 2D, basé sur la méthode des éléments finis, d'une structure de la machine synchrone à aimants enterrés, ayant 24 encoches statoriques et 2 paires d'aimants enterrés au rotor.

Le but est de déterminer ses caractéristiques statiques (induction magnétique, flux par phase, couple de détente), et montrer l'influence de la variation des dimensions et le type d'aimants permanents sur les performances de la machine.

## **Mots clés :**

Machine synchrone à aimants permanents, calcul numérique, équations de Maxwell, méthode des éléments finis.

## **Abstract**

The study which will be presented in this thesis concerns the 2D numerical calculation, based on the finite element method, of the structure of the synchronous machine with buried magnets and with 24 stator slots and 2 pairs of magnets buried in the rotor. The goal is to note its static characteristics (magnetic induction, flux per phase, expansion torque) and show the influence of the variation in the dimensions and type of the permanent magnets on the performance of the machine.

