

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

**SPECIALITE : Commande des machines tournantes.**

THEME

---

**Etude d'une Machine Synchrone à Aimants  
Permanents à Double Excitation**

---

Proposé et dirigé par :

Mr. LADGHEM CHIKOUCHE Brahim

Présenté par :

Mr. YOUSFI RABIE  
MERZOUGUI YACINE

Année Universities: 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciement

Avant tout, je remercie DIEU le Tout-puissant d'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mon remerciement et ma gratitude à mon encadreur Mr. LADGHEM CHIKOUCHE Brahim qui m'a aidé pour rendre ce travail effectif.

Mon remerciement aussi au chef de département de génie électrique de l'université de M'sila et à tous les enseignants qui m'ont enseignés durant les années du cursus.

Mon remerciement est également aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui ont aidée de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents et grands parents
- Mon frère et ma sœur.
- Toute ma famille et tous mes amis.

## *Sommaire*

Remerciement .....	3
Dédicaces .....	4
Introduction générale.....	10
Chapitre I: Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants permanents.....	11
I.1.Introduction.....	12
I.2Aimants permanents.....	12
I.2.1Définition.....	12
I.1.2.2.Caractéristiques générales des aimants permanents.....	13
I.2.3. Différents types d'aimants permanents .....	14
I.3.Principales structures de la MSAP.....	15
I.3.1 Les configurations rotoriques .....	15
I.3.1.1.Rotor extérieur à aimants permanents .....	15
I.3.1.2.Rotor intérieur à aimants permanents .....	16
I.3.1.2.1. Les structures avec pièces polaires .....	17
I.3.1.2.1.1.Structure avec pièces polaires sans concentration de flux.....	17
I.3.2.Structures d'une Machine synchrone à aimants permanents à flux axial .....	20
I.3.3 Les machines à flux radial .....	21
I.3.3.1Aimants en surface .....	22
I.3.3.2Aimants insérés.....	22
I.3.3.3Aimants enterrés .....	22
I.4. Principe de fonctionnement de la MSAP .....	23
I.5. Avantages et inconvénients des MSAP .....	24
I.5.1. Les avantage .....	24
I.5.2. Les inconvénients .....	24
I.6. Domaines d'application de la machine synchrone à aimants permanents: .....	25
I.6.1. Applications aux petites puissances:.....	25
I.6.2 Applications aux moyennes puissances .....	27
I.6.3 Applications aux fortes puissances .....	28
I.7 Principe de L'autopilotage des Machines Synchrones.....	29
I.8 Différents modes d'alimentation des MSAP.....	30
I.8.1 Onduleur de tension.....	30
I.8.2 Alimentation par courants sinusoïdaux.....	31
I.8.3 Alimentation par courants de forme rectangulaire.....	31

I.9 Conclusion .....	32
Chapitre II :Modélisation par Eléments Finis de MSAP à Double Excitation .....	33
II.1. Introduction .....	34
II.2. Les Equations de Maxwell.....	34
III.2.1. Première équation de Maxwell.....	34
II.2.2.Deuxième équation de Maxwell.....	34
II.2.3. Troisième équation de Maxwell .....	35
II.3. Hypothèses simplificatrices.....	35
II.4. Relations du milieu .....	36
II.4.1. Relations magnétiques.....	36
II.4.2. Relation diélectrique.....	36
II.4.3. Relations de passages .....	37
II.5.1. La Méthode des éléments finis .....	37
II.5.2. Principe.....	38
II.5.3. Avantages de la M.E.F .....	38
II.5.4. Inconvénients de la M.E.F.....	39
II.5.5. Logiciel éléments finis FEMM.....	39
II.5.6. Les domaines d'application.....	41
II.6. Conclusion .....	41
Chapitre III : Modalisation par calcul de champ.....	42
III.1Introduction .....	43
III.2.Paramètres de la machines étudié.....	43
III.3.1.Maillage et champ magnétique de la structure.....	47
III.4.Etude du champ dans l'entrefer.....	49
III.4.1.Cartes de champ magnétique .....	49
III.5.1.Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 9°).....	50
III.5.2.Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 12°).....	51
III.5.3.Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 15°).....	51
III.5.4.Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 18°).....	52
III.6.Etude sur les différents couples .....	52
III.6.1.Le couple de détente.....	52
III.6.2.Le Couple de réluctance.....	52
III.7.Influence de différente ouverture des encoches rotoriques sur les différents couples.....	53
III.8. Résultats du couple de détente .....	55
III.9. Comparaison du couple de détente.....	56
III.10.Méthode de calcul flux.....	56
III.11. Calcul des flux magnétique.....	58
III.12. Méthode de Calcul de la force électromotrice.....	59

III.12.1. Calcul de la force électromotrice .....	60
III.13. Etudes de la machine à l'état de saturation .....	61
III.14. Cartes de champ magnétique à l'état de saturation .....	62
III.15. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 9°) .....	63
III.16. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 12°) .....	64
III.17. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 15°) .....	64
III.18. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 18°) .....	65
III.19. Influence des différentes ouvertures des encoches rotoriques sur les différents couples .....	65
III.20. Résultats du couple de détente .....	67
III.21. Comparaison du couple de détente .....	68
III.22. Calcul de flux à l'état de saturation .....	69
III.24. Conclusion .....	71
Conclusion générale .....	72
Références bibliographiques .....	73

## Listes des figures

Figure (I.1). Circuit magnétique associé à un aimant .....	13
Figure (I.2) Illustration d'une courbe B-H des aimants .....	14
Figure (I.3). Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants [BN15] .....	15
Figure (I.4). Les moteurs synchrones à rotor externe [REA] .....	16
Figure (I.5). Rotor intérieur à aimants permanents [CDA11] .....	16
Figure (I.6). Structure de rotor avec pièces polaires sans concentration de flux .....	17
Figure (I.7). Structure à aimantation azimutale    Figure (I.8). Structure à aimantation mixte .....	18
Figure (I.9). Structure d'une machine à aimants permanents sans pièces polaires [GH14] .....	19
Figure (I.10). Aimantation tangentielle [GH14] .....	19
Figure (I.11). Aimantation radiale [GH14] .....	19
Figure (I.12): Aimantation mixte [GH14] .....	19
Figure I 13 Structures d'une Machines synchrones à flux axial .....	21
Figure (I.14). La MSAP avec rotor intérieur .....	22
Figure (I.15). Machine Synchrone à aimants permanents enterrés [SH08] .....	23
Figure (I.16). Exemples d'application de la MSAP aux petites puissances [AH20] .....	26
Figure (I.17). Exemples d'application de la MSAP aux grandes puissances [AH20] .....	29
Figure (I.18). Alimentation par courants rectangulaires et couple résultant. ....	32
Figure (III.19). Machine à double excitation [SH08] .....	46
Figure (III.20). stator avec bobinage [SH08] .....	46
Figure (III.21). Machine à double excitation [SH08] .....	47
Figure (III.22). Représentation du maillage de la machine à double excitation .....	47
Figure (III.23). Représentation des lignes et distribution du flux magnétique pour MSDE .....	48
Figure (III.24). Illustration du maillage de la zone de l'entrefer. ....	48
Figure (III.25). Distribution du champ magnétique pour différentes ouverture des encoches. ....	49
Figure (III.26). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 9° .....	50
Figure (III.27). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 12° .....	51
Figure (III.28). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 15° .....	51

Figure (III.29). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 18° .....	52
Figure (III.30). Répartition de couple de détente et réductant dans l'entrefer, cas une ouverture 9° .....	53
Figure (III.31). Répartition de couple de détente et réductant dans l'entrefer, cas une ouverture 12° .....	54
Figure (III.32). Répartition de couple de détente et réductant dans l'entrefer, cas une ouverture 15° .....	54
Figure (III.33). Répartition de couple de détente et réductant dans l'entrefer, cas une ouverture 18° .....	55
Figure (III.34). Flux magnétique d'une ouverture 9°	Figure (III.35). Flux magnétique d'une ouverture 12° .....
Figure (III.36). Flux magnétique d'une ouverture 15°	Figure (III.37). Flux magnétique d'une ouverture 18° .....
Figure (III.38). force électromotrice cas une ouverture 9°	Figure (III. 39). force électromotrice cas une ouverture 12° .....
Figure (III.40). force électromotrice cas une ouverture 15°	Figure (III.41). force électromotrice cas une ouverture 18° .....
	60
Figure (III. 42). Représentation Du maillage Machine à double excitation .....	61
Figure( III.43): Représentation Du Lignes et distribution du flux magnétique pour MSDE.....	61
Figure ( III.44): Illustration du maillage de la zone de l'entrefer.....	62
Figure (III. 45). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 9° .....	63
Figure (III.46). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer pour une ouverture 12° .....	64
Figure (III.47). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer pour une ouverture 15° .....	64
Figure (III.48). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer pour une ouverture 18° .....	65
Figure (III.49). Couple de détente et réductant, pour une ouverture 9° .....	65
Figure ((III.50). Couple de détente et réductant, cas d'une ouverture 12° .....	66
Figure (III. 51): Couple de détente et réductant, cas d'une ouverture 15 .....	66
Figure (III.52). Couple de détente et réductant, cas d'une ouverture 18 .....	67
Figure (III.53). Flux magnétique d'une ouverture 9°	Figure (III. 54). Flux magnétique d'une ouverture 12° .....
Figure (III. 55). Flux magnétique d'une ouverture 15°	Figure (III.56). Flux magnétique d'une ouverture 18° ...
Figure (III.57). force électromotrice cas d'une ouverture 12° .....	70
Figure (III.58). force électromotrice cas d'une ouverture 9° .....	70
Figure (III. 59). force électromotrice cas d'une ouverture 15°	Figure (III. 60). force électromotrice cas une d'ouverture 18° .....
	70

## LISTE DE SYMBOLES

Br	Induction rémanente (ferrite)
Mr	Perméabilité relative des aimants
P	Nombre de paires de pôles
Qs	Nombre d'encoches de stator
Nr	Nombre d'encoches du rotor
NC	Nombre de conducteurs par encoche statorique
Im	Courant de crête
If	Courant d'excitation de l'électro-aimant
Nf	Nombre de conducteurs par encoche rotoriques
r0	Rayon extérieur de l'encoche rotoriques

$r_1$	Rayon intérieur de l'encoche rotoriques
$r_2$	Rayon extérieur de l'aimant
$r_3$	Rayon extérieur de l'encoche de stator
$r_4$	Rayon intérieur de l'encoche de stator
$R_0$	Rayon externe de stator
$R_S$	Rayon de la surface intérieure du stator
$R_m$	Rayon de la surface externe du rotor
$R_r$	Rayon de la surface interne du rotor
$g$	Largeur de l'entrefer
$h_s$	Hauteur de le l'encoche statorique
$LU$	Longueur utile de la machine
$C$	Ouverture des encoches statorique
$C_r$	Ouverture des encoches rotoriques
$dr$	Ouverture de la semi ouverture des encoches rotoriques
$b$	Ouverture de la semi- ouverture des aimants
$d$	Ouverture de la semi ouverture des encoches statorique
$a$	Ouverture proportionnelle de l'aimant
$H$	Champ magnétique
$H_{cb}$	Champ coercitif de l'induction
$B_m$	L'induction maximale
$H_m$	Champ maximale
$W_r$	Vitesse angulaire
$\omega_s$	Pulsation de l'alimentation triphasée
$c_e$	Couple électromagnétique
$3D$	Troie dimension
$2D$	Deux dimensions
$j_i$	Courant d'induit
$j_{ex}$	Courant d'excitation
$\sigma$	la conductivité électrique
$\epsilon$	Permittivité du milieu de champ électromagnétique

## Liste des tableaux

Table (III.1). Paramètres de la machines MSDE.....	44
Table III: Résultats du couple de détente à l'état de saturation.....	67

## LISTE DES ABREVIATIONS

MSAP : Machine synchrone a aiment permanent

MSDE : Machine synchrone double excitation

FEM : Force électromotrice

FEMM : Finit élément magnétique méthode

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

PWM : Pulse width modulation

Nd-Fe-B : Néodyme-fer -bore

ALINCO : Aluminium –Nikel –Coulbat

SmCO5: samarium-cobalt

## Introduction générale

L'augmentation croissante de l'utilisation des machines électriques dans diverse application grandement contribué à la forte demande d'énergie dans le monde. Afin de limiter l'importante consommation d'énergie et les problèmes d'environnement générés, les solutions d'entraînements électriques plus compactes et à rendement plus élevé sont devenues très recherchées. Ainsi, les machines conventionnelles sont de plus en plus remplacées par les machines synchrones à aimants permanents à structures spéciales. En effet, de telles structures n'ayant aucun enroulement au rotor, donc moins de pertes de cuivre, présentent un rendement plus élevé que celui des machines conventionnelles. Cependant, dans la plupart des applications, ces machines sont couplées des convertisseurs d'électronique de puissance afin de répondre aux exigences de la charge [AMC11] [JF08] [WS05].

Dans cette recherche, nous étudions la (MSDE), nous avons partagé notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre est une étude générale sur la machine synchrone à aimants permanents, en présentant les composants de base de cette machine, ses types, structures et domaines d'utilisation.

En suit, dans le second chapitre une explication de la méthode des éléments finis que nous utilisons dans la modélisation de cette machine, ainsi que les équations de Maxwell.

En fin, dans le troisième chapitre nous présentons les calculs qui ont été effectués sur la machine synchrone à aimants permanents (MSDE).

# **Chapitre I: Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants permanents**

## **I.1.Introduction**

Les Moteurs Synchrones à Aimants Permanents (MSAP), appelés encore moteurs à courant continu sans collecteur, se développent de manière importante à l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité permettant d'obtenir un couple volumique élevé et une inertie très faible. De plus, ils ont des inductances relativement faibles, ce qui entraîne des réponses rapides des courants et donc du couple. Lorsque le nombre de pôles est élevé, les puissances peuvent atteindre quelque centaines de kilowatts. Les machines synchrones à aimants permanents occupent une place importante dans les équipements industriels. Ils possèdent de meilleures caractéristiques couple-vitesse, des performances dynamiques élevées, de bons rendements, des gammes de vitesses de fonctionnement importantes, de bonnes durées de vies, les rendant bien adaptés aux applications où l'encombrement et la masse sont d'importants critères, comme dans les applications embarquées. Ce type de moteurs sont utilisés largement dans plusieurs applications, la robotique, les véhicules électriques et hybrides, l'aérospatial, les outils électriques, la production des sources d'énergies renouvelables, les divers équipements médicaux...etc. [AMC11]. Dans ce chapitre nous présenterons principalement les généralités sur les machines électriques à aimants permanents qui se traduisent par la constitution physique, la classification et le principe de fonctionnement.

## **I.2Aimants permanents**

### **I.2.1Définition**

Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique qui possède une aimantation rigide susceptible de créer un champ magnétique extérieur et de maintenir en permanence une force magnétique [BA11].

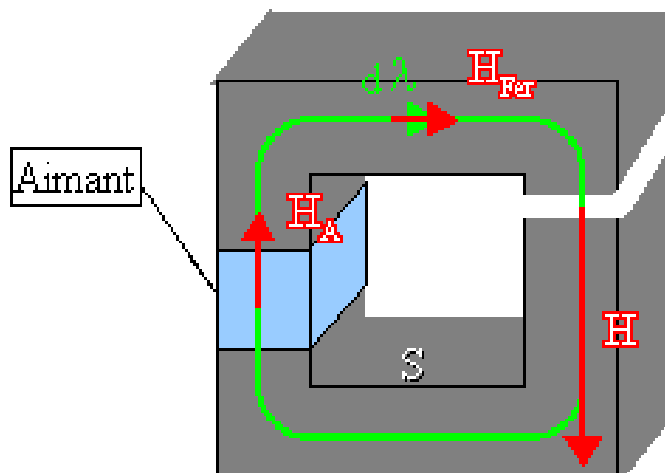


Figure (1.1). Circuit magnétique associé à un aimant

### I.1.2.2. Caractéristiques générales des aimants permanents

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan BH Figure (I.2). Cette courbe est caractérisée par :

- » L'induction rémanente  $B_r$ , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé, c'est une indication de la puissance potentielle de l'aimant.
  - » Le champ coercitif de l'induction  $H_{cb}$  qui est le champ démagnétisant annulant l'induction résiduelle, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant n'est stable.
  - » Le produit d'énergie volumique  $(BH)_{max}$ .
  - » Les valeurs  $H_m$  et  $B_m$  du point de fonctionnement optimal M correspondant à  $(BH)_{max}$ .
- On peut classer les différents types d'aimants en fonction de ces paramètres.

En plus de ces propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître le point de curie qui représente la température au-delà de laquelle l'aimant perd ces propriétés magnétiques. Il est indispensable de connaître aussi les propriétés mécaniques et physicochimiques, le prix, la perméabilité réversible, ainsi que la caractéristique magnétique [BB06] [BA11].

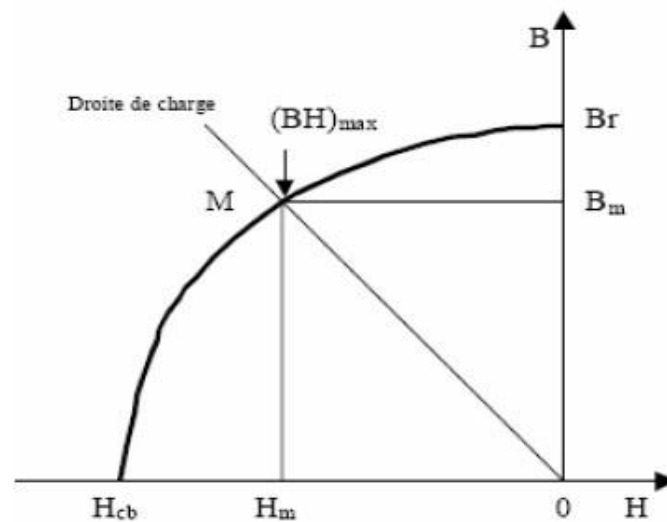


Figure (I.2) Illustration d'une courbe B-H des aimants

### I.2.3. Différents types d'aimants permanents

Les matériaux utilisés au niveau des machines électriques, du point de vue de leurs propriétés magnétiques peuvent se classer en deux grandes familles:

- » Les matériaux magnétiques durs qui sont des aimants permanents.
- » Les matériaux magnétiques doux qui ne présentent des propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation extérieure.

Il existe maintenant une grande variété de matériaux pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont très diverses. Ce sont, soit des matériaux céramiques, soit des matériaux métalliques

Parmi les aimants les plus utilisés, on peut citer deux types :

- » Les aimants permanents "terres rares" ( $SmCO_5$  et  $Sm_2C17$ ),  $NdFeB$ ,
- » Les aimants à alliages métalliques, ferrites (aimants robustes et peu coûteuses),

Alnicos.

On note que les aimants permanents du type terres rares ( $SmCo$ ,  $NdFeB$ ) sont les plus utilisés car ils présentent une induction rémanente ( $B_r$ ) et un champ coercitif  $H_c$  (kA/m) plus élevés.

Ces aimants sont très appréciés par les constructeurs, car ils permettent une réduction importante du poids et de l'encombrement de la machine pour une même puissance, puisque ils possèdent une puissance massique élevée. En effet, la puissance électrique d'une machine à aimants permanents est directement proportionnelle à la densité d'énergie emmagasinée dans les aimants. La courbe ci-dessous présente la courbe désaimantation des différents aimants cités [AHF10], [SOB10].

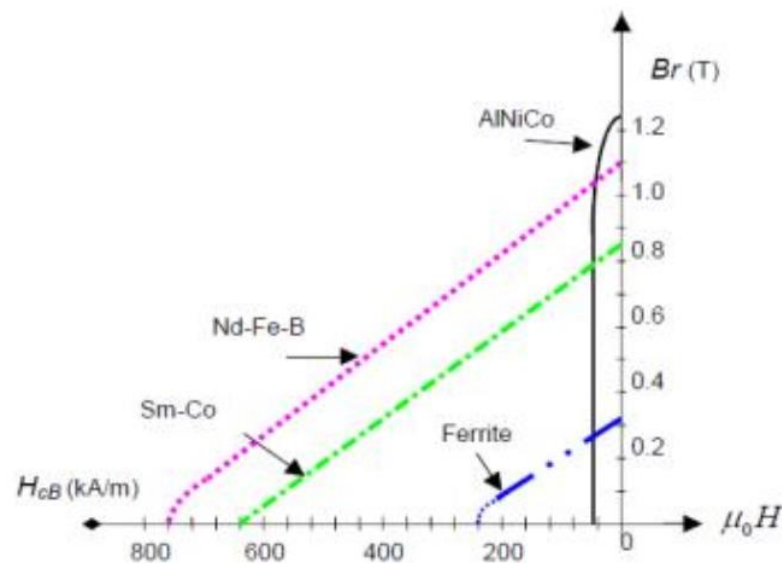


Figure (I.3). Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants [BN15]

## I.3.Principales structures de la MSAP

### I.3.1 Les configurations rotoriques

Il existe deux familles structurelles [KW00]:

#### I.3.1.1.Rotor extérieur à aimants permanents

Dans cette structure, les aimants permanents sont montés sur la surface extérieure du rotor. Les aimants peuvent être placés sur la surface du rotor de différentes manières, tels que des aimants en surface (surface-mounted magnets), des aimants encastrés (Embedded magnets) ou des aimants insérés dans des poches (interior magnets). Les aimants permanents génèrent un champ magnétique fixe qui interagit avec les bobines du stator alimentées en courant alternatif pour créer un champ magnétique tournant dans l'entrefer de la machine.

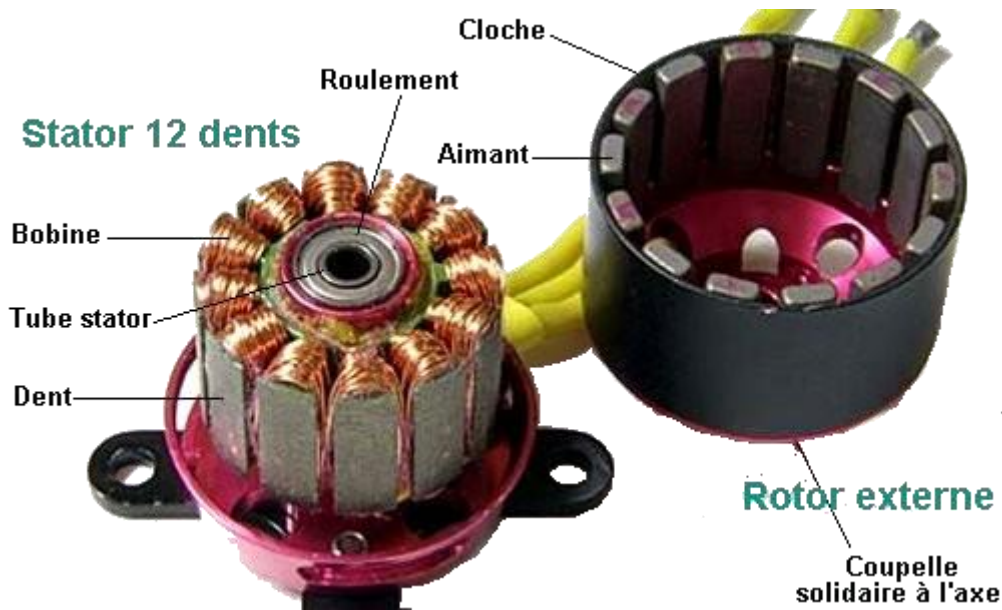


Figure (I.4). Les moteurs synchrones à rotor externe [REA]

### I.3.1.2. Rotor intérieur à aimants permanents

Dans cette structure, les aimants permanents sont montés sur la surface intérieure du rotor. Les aimants peuvent être placés sur la surface du rotor de différentes manières, tels que des aimants en surface, des aimants encastrés ou des aimants insérés dans des poches. Les aimants permanents génèrent un champ magnétique fixe qui interagit avec les bobines du stator alimentées en courant alternatif pour créer un champ magnétique tournant dans l'entrefer de la machine.



Figure (I.5). Rotor intérieur à aimants permanents [CDA11]

Chacune de ces deux familles se subdivise en 2 sous-groupes [GJ92]:

### I.3.1.2.1. Les structures avec pièces polaires

Comme dans les machines synchrones classiques à pôles saillants, la saillance a pour effet de produire une anisotropie au niveau du rotor dont la conséquence est de produire un couple relustrant qui vient s'ajouter au couple d'interaction. A ce principal rôle que doivent assurer les pôles saillants dans les machines à aimants, un autre rôle peut leur être confié, c'est celui de la concentration de flux. Les pièces polaires permettant également de fixer les aimants sans avoir à utiliser des frettes et de réduire de façon significative l'épaisseur équivalente de l'entrefer ainsi que le volume des aimants par rapport aux structures sans pièces polaires. Les aimants ferrites et à terres rares peuvent être utilisés. Cependant, dans ce type d'inducteurs, la réaction d'induit est relativement plus importante [AM07].

#### I.3.1.2.1.1. Structure avec pièces polaires sans concentration de flux

Généralement les aimants sont à aimantation radiale et placés sous des pièces polaires figure(I.6), afin de diminuer l'entrefer magnétique dans le but d'améliorer les performances de la machine. Par contre la réaction d'induit sera plus importante, et il faut en tenir compte lors du choix du type d'alimentation [BB06].

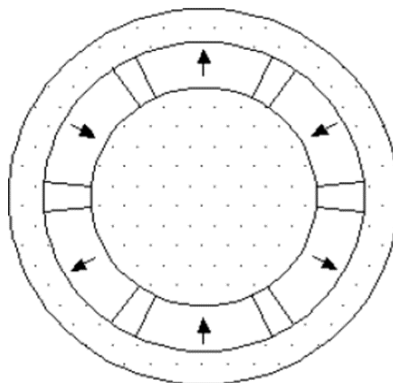


Figure (I.6). Structure de rotor avec pièces polaires sans concentration de flux

#### I.3.1.2.1.2 Structure avec pièces polaires et concentration de flux

Elles permettent d'améliorer, le niveau de l'induction dans l'entrefer, donc le flux à vide et par conséquent le couple, grâce aux pièces polaires surtout pour les moteurs constitués d'aimants

présentant une faible induction rémanente comme les ferrites [AM07]. Il existe plusieurs catégories que l'on peut distinguer par l'existence des pièces polaires et la disposition des aimants à l'intérieur du rotor (Figure I.7) (Figure I.8).

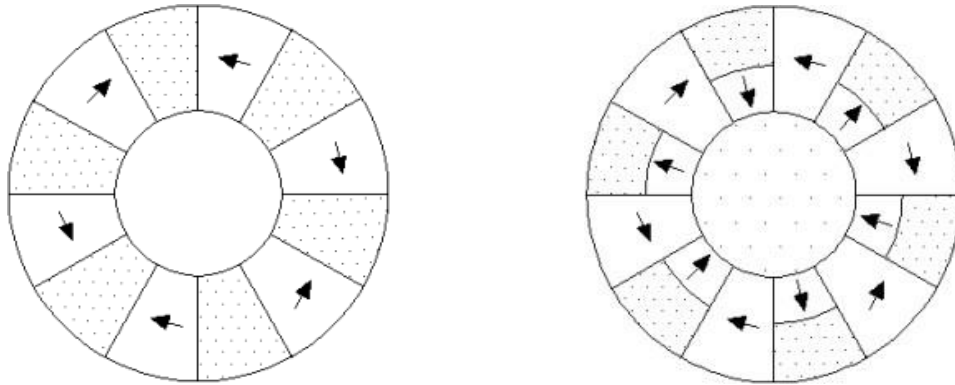


Figure (I.7). Structure à aimantation azimutale Figure (I.8). Structure à aimantation mixte

### .3.1.2.2 Structures sans pièces polaires

Les aimants, en forme de barreaux élémentaires juxtaposés, sont directement fixés sur la surface du rotor grâce à des frettes figure (I.9). Le sens d'aimantation peut être radial figure (I.11), tangential figure (I.10) ou mixte figure (I.12), les structures à pôles lisses sont caractérisées par un entrefer assez large accentué par l'épaisseur des aimants et par celle de la frette de maintien. De ce fait, l'inductance statorique est plus faible que celle d'une machine classique à rotor bobine à pôles lisses. Il est alors difficile d'obtenir un couple massique important. Ainsi, la réaction de l'induit est plus réduite, ce qui favorise une commande plus simple. De plus, pour une amélioration des performances des machines à aimants, l'utilisation des terres rares est plus recommandée pour cette structure [AM07] [BB06].

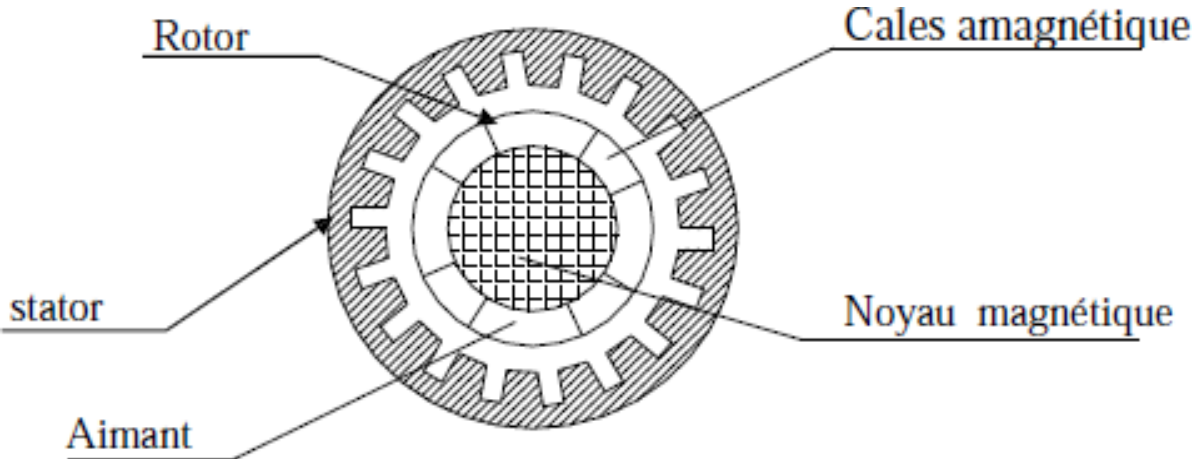


Figure (I.9). Structure d'une machine à aimants permanents sans pièces polaires [GH14]

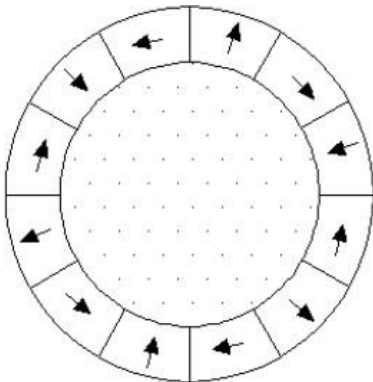


Figure (I.11). Aimantation radiale [GH14]

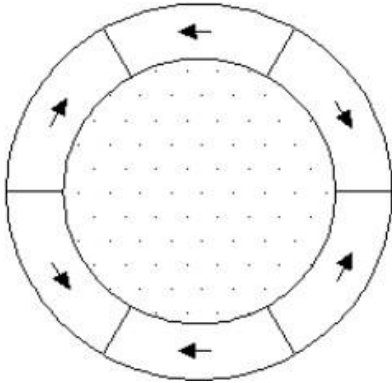


Figure (I.10). Aimantation tangentielle [GH14]

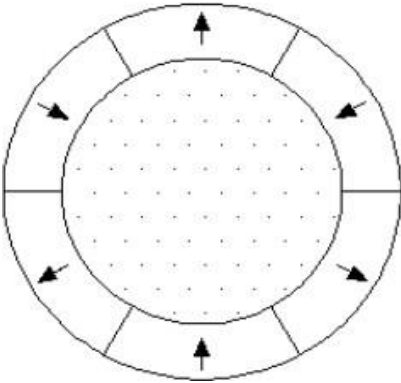


Figure (I.12): Aimantation mixte [GH14]

### **I.3.2.Structures d'une Machine synchrone à aimants permanents à flux axial**

Plusieurs configurations de machines synchrones à flux axial peuvent être trouvées concernant les positions de rotor et les arrangements d'enroulement donnant des degrés de libertés en vue de choisir la structure de la machine la plus appropriée dans l'application considérée. Les configurations possibles sont :

- » Structure avec un seul rotor et un seul stator
- » Structure dans laquelle le stator est situé entre les rotors
- » Structure dans laquelle le rotor est placé entre des stators
- » Structure à plusieurs étages comprenant plusieurs rotors et stator

La structure simple-stator et simple-rotor, est la configuration à aimant permanent, de machine à flux axial la plus simple (Campbell, 1974 ; Kurronen, 2003). Cette structure souffre, cependant, d'une force axiale non équilibrée entre le rotor et le stator par suite duquel des arrangements plus complexes de roulement et un disque plus épais de rotor donc nécessaires, ceci comparé aux structures pour lesquelles les forces axiales sont équilibrées.

La structure simple stator-double rotor est une machine à flux axial qui a ses enroulements de phase autour du stator encoché ou avec un stator non-encoché. La machine de type torique à aimants permanents avec le stator non-encoché, a été présentée vers la fin des années 80. L'enroulement de phase est à extrémité courtes, ce qui améliore le rendement et la densité de puissance de la machine. Comme inconvénient, la fixation du stator à l'armature (carcasse) est plus complexe comparé à la structure opposée dans laquelle le rotor est placé entre les stators désignés sous le nom de machine à un aimant permanent à rotor intérieur à flux axial.

Des arrangements plus complexes peuvent être trouvés en assemblant plusieurs machines alignées sur le même axe et en formant une machine à plusieurs étages à flux axial. De telles machines peuvent être considérées pour l'usage d'entraînement de propulsion de bateau, pompe et application de générateur de vitesse élevée [RL06].

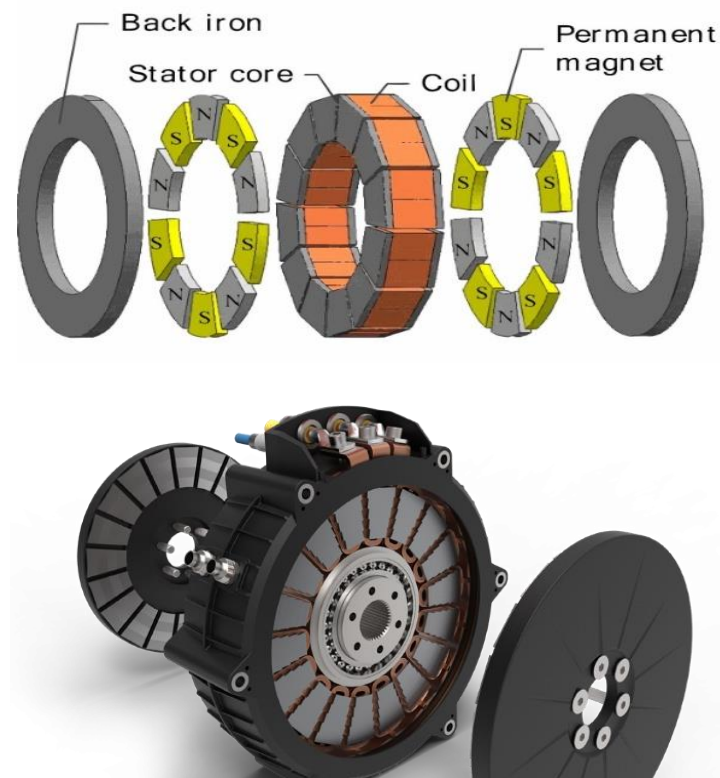


Figure I 13 Structures d'une Machines synchrones à flux axial

### I.3.3 Les machines à flux radial

La machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents apparue dans l'industrie. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la performance des aimants permanents, elle commence à supplanter la machine asynchrone. La première machine synchrone à flux radial développée est une machine dont le bobinage est réparti et les aimants placés en surface. Il est possible de l'utiliser pour équiper un turbo compresseur (50 kw, 70000 tr /min, 8 pôles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile (40kw, 6000 tr/min, 4 pôles).

L'inconvénient majeur de cette machine est l'emplacement des aimants permanents en surface, les applications à haute vitesse sont difficiles.

C'est pourquoi, pour diminuer le risque de décollement des aimants, le rotor de la machine peut être placé à l'extérieur du stator. Ainsi, les aimants en surface sont placés sur le rotor grâce à l'effet de la force centrifuge [WS05].

En fonction de la disposition des aimants au rotor, on distingue plusieurs configurations pour la machine à rotor intérieur:

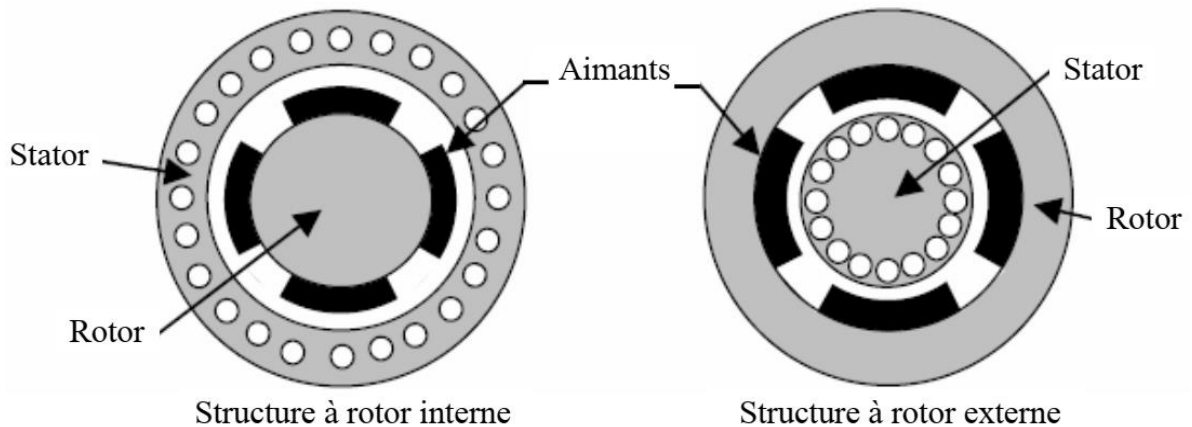


Figure (I.14). La MSAP avec rotor intérieur

### I.3.3.1 Aimants en surface

Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur la surface du rotor ; ils sont alimentés radialement. Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de la machine avec des aimants en surface est sa simplicité donc faible cout de fabrication par rapport à d'autres machines à aimant. L'inconvénient est l'exposition des aimants permanente aux champs démagnétisation. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège l'aimant permanent de la désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuge. Ce cylindre peut plus fournir un couple de démarrage synchrone et agir comme un amortisseur. Dans le cas des aimants du type terre rares, la réactance synchrone dans l'axe-d et l'axe-q sont pratiquement les même [JF08].

### I.3.3.2 Aimants insérés

Comme les machines avec aimant 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. Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réductant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe-q est légèrement supérieure à celle dans l'axe-d [WS05].

### I.3.3.3 Aimants enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor 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 dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses [WS05].

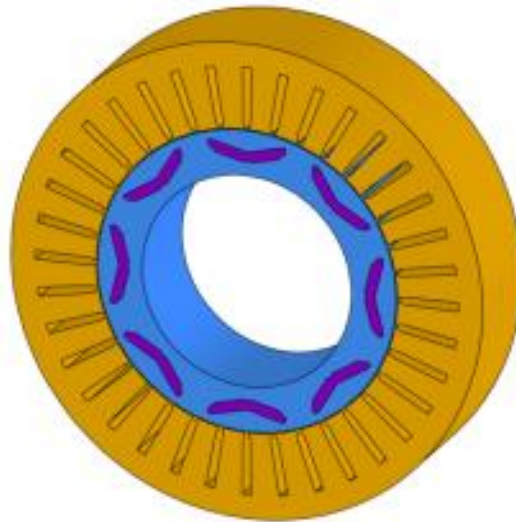


Figure (I.15). Machine Synchrone à aimants permanents enterrés [SH08]

#### I.4. Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotoriques doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotoriques est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [OUB10].

Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [MAH12].

Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotoriques [AID13].

## **I.5. Avantages et inconvénients des MSAP**

Les machines synchrones à aimants permanents (PM) sont des machines électriques qui utilisent des aimants permanents pour créer un champ magnétique. Voici quelques avantages et inconvénients de ces machines :

### **I.5.1. Les avantages**

La machine synchrone à aimants permanents présente les avantages suivants : )

- » Robustesse incontestée par rapport à la machine à courant continu )
- » Augmentation de la constante de temps thermique et de la fiabilité grâce à l'élimination des bagues balais. )
- » Facteur puissance et rendement plus élevé par rapport à la machine asynchrone. )
- » Cette structure donne à la machine l'avantage de réduire les dimensions et par conséquent un moindre moment d'inertie, ce qui augmente sa fiabilité et sa densité de puissance par unité de volume.
- » L'utilisation d'aimant permanent au rotor permet d'éliminer les pertes électriques dans le circuit rotoriques.
- » Elle possède un couple moteur élevé au démarrage ce qui permet d'éliminer le multiplicateur de vitesse pour le système éoliens [DR07]

### **I.5.2. Les inconvénients**

- » Dans le moteur synchrone à aimants permanents le commutateur mécanique du moteur à courant continu est remplacé par un commutateur électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle de ce moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu.
- » Un désavantage du moteur synchrone est la présence de pulsations de couple. Selon la méthode de commutation utilisée, le moteur synchrone est plus ou moins sujet à ce phénomène. La commutation sinusoïdale d'un Contrôleur complexe et de capteur de courant sophistiqué (coûteux). La commutation trapézoïdale, permet d'utiliser un contrôleur et des capteurs de courant plus

simples et moins coûteux (exemple: capteur à effet hall), mais implique la présence de fortes pulsations de couple.

» La présence d'aimants permanents majore le prix des moteurs synchrones, notamment dans le cas de l'utilisation d'aimants de type terre rare. Ces aimants présentent de très grandes qualités (champs coercitif, tenue en chaleur, etc.) Par rapport aux aimants «ferrites mais ont un prix aussi Beaucoup plus élevé.

» Le contrôle basé sur une commutation électronique augmente la complexité et donc le prix du contrôleur et du variateur. Cela s'ajoute le coût des capteurs supplémentaires nécessaires à la boucle du courant.

» Risque de désaimantation (irréversible): limite de température maximale, courant maximum, fluxage impossible dans les machines à courant continu, possible dans les machines synchrone par contrôle de l'angle d'autopilotage.

» Pertes par courants de Foucault dans les aimants [ABH09].

## **I.6. Domaines d'application de la machine synchrone à aimants permanents:**

### **I.6.1. Applications aux petites puissances:**

Pour les applications à faibles puissance (<600W en se basant sur la norme de construction électrique NF C 51-200) où la masse et la vitesse de rotation sont des critères importants, les moteurs à courant continu sans balais à aimants permanents ou (BLDC) dominant de nombreuses applications, en particulier les lecteurs CD/DVD, disque durs d'ordinateur, petits ventilateurs, les appareils électroménager (machine à laver, réfrigérateur, aspirateur,...etc) ou l'instrumentation médicale comme les fraises de dentiste qui fonctionnent à des vitesses élevées. La figure I.6 montre quelques exemples d'application de la MSAP aux petites puissances [AH20].

Les avantages de ce type de machine sont nombreux et on notera principalement la simplicité de la réalisation du contrôle, l'utilisation d'un système peu coûteux pour la détermination de la position et un gain sur la puissance massique. Ces moteurs offrent de plus, le rapport du couple délivré à la taille du moteur le plus haut, ce qui les rend utile dans les applications où l'espace et le poids sont des facteurs critique.



Figure (I.16). Exemples d'application de la MSAP aux petites puissances [AH20]

De nombreux travaux de recherche ont été fait pour des applications du BLDC aux petites puissances, citons à titre d'exemple : Les machines à laver, les disques durs d'ordinateur, la robotique, l'aérospatial.... etc.

Les entraînements directs deviennent également de plus en plus courants dans les applications nécessitant une vitesse précise et les contrôles de position. Ces applications incluent les machines-outils, les tables tournantes, les radars, télescopes,... etc. Les moteurs utilisés dans ces applications sont ce qu'on appelle les moteurs à couple qui sont des servomoteurs CC sans balai avec (généralement) des aimants permanents montés en surface sur le rotor [AH20].

## I.6.2 Applications aux moyennes puissances

Dans cette partie, les systèmes étudiés sont ceux nécessitant des puissances comprises entre 500W et 100kW et utilisant ou susceptibles d'utiliser des MSAP, ces machines sont pour la plupart polyphasées (généralement triphasées) et associées à un onduleur de tension commandé en courant afin d'assurer l'autopilotage.

Une première application dans cette gamme de puissance repose sur la motorisation des véhicules électriques divers. En effet, les tendances actuelles conduisent au développement des accumulateurs électriques (batteries Lithium/ion...) et au développement des moteurs électriques au détriment des moteurs thermiques dont le rendement est plus faible et le combustible fossile en voie d'épuisement. Comme cela a été vu précédemment, le moteur brushless possède des caractéristiques intéressantes pour les systèmes embarqués.

Certains véhicules électriques ou hybrides comme la Toyota-Prius ou la Citroën-C0 sont donc équipés de MSAP. Dans le même ordre d'idée, des études sur les véhicules 2-roues sont aussi entreprises (scooter, vélos à assistance électrique...). Certaines machines à outils et robots industriels utilisent aussi des moteurs brushless car ils apportent des bonnes performances ; c.-à-d. bon couple à faible vitesse, forte capacité de surcharge, fiabilité de vitesse ... et nécessitent peu de maintenance.

Tous les exemples décrits précédemment sont illustrés sur la figure (I.14) De par ses avantages, la MSAP peut aussi être utilisée dans beaucoup d'entraînements de divers mécanismes et ce particulièrement pour les systèmes où le poids et le volume jouent un rôle important. Si c'est déjà le cas pour certains systèmes dans les voitures (ventilation, climatisation...), il est aussi envisageable d'augmenter leur pénétration dans d'autres domaines tel que l'aéronautique où il est de plus en plus question de l'avion plus électrique ou de l'avion tout électrique [MA12].



Vélo à assistance

Voiture électrique

Machine outil

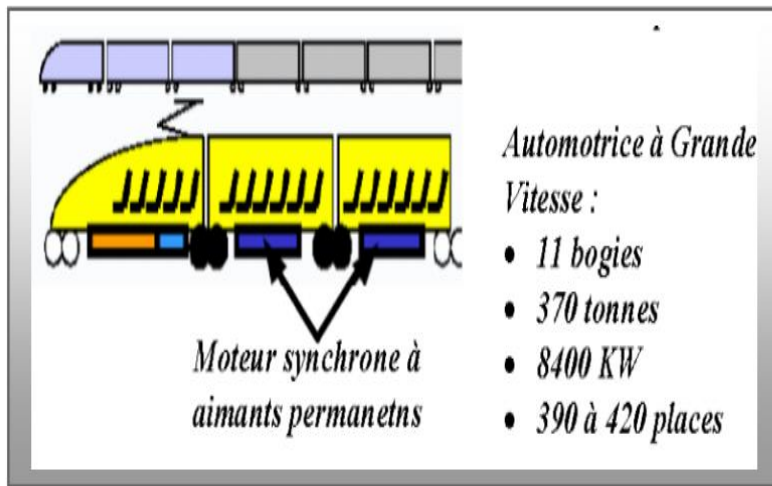
robot industriel

Figure (I.16). Exemples d'application de la MSAP aux moyennes puissances

### I.6.3 Applications aux fortes puissances

Dans des applications de plus forte puissance où les contraintes d'encombrement sont importantes comme la traction électrique ou la propulsion navale, les MSAP sont de plus en plus envisagées. Dans le cadre de l'application de la MSAP pour la propulsion naval, les moteurs utilisés doivent en effet être compacts, légers, fiables, résistants à l'environnement marin (vibrations, humidité, salinité, températures ...). La référence présente une étude comparative de trois types de machine synchrone à aimants (cylindriques, discoïdes à champ axial et à flux transverse). A la fin de l'étude, il a été montré que la machine synchrone à aimants permanents montés sur la surface du rotor est la mieux adaptée pour cette application. Pour son application en traction électrique, l'AGV (automotrice à grande vitesse) d'Alstom utilise ainsi des MSAP pour la traction et le freinage électrodynamique du train. Les moteurs utilisés ont une puissance nominale de 720 kW et un rapport puissance/poids de 1kW/kg (contre maximum 0.7kW/kg pour le moteur asynchrone du TGV-POS). En raison de sa large plage de vitesse à puissance constante et de son excellent rendement, il est aussi envisageable d'augmenter sa pénétration dans d'autres domaines tel que l'aéronautique où il est de plus en plus question de "l'avion plus électrique" ou de "l'avion tout électrique". Les principaux atouts de cette machine sont d'avoir un fort couple massique, pouvant dépasser 3 Nm/kg, ainsi que de très bons rendements (> 95%). Ses inconvénients sont le coût des aimants permanents, et la gestion du flux d'excitation des aimants en cas de défauts. L'exemple des commandes de vol électriques est développé plus en détail dans les références.

En plus, dans le domaine de production d'énergie électrique, la MSAP a déjà été utilisée dans le cadre d'exploitation du potentiel énergétique éolien sur des sites isolés avec raccordement au réseau de distribution. En effet, l'inducteur à aimant garantit la présence des forces électromotrice (f.é.m) et la possibilité de freiner en cas de vents violents, ce qui permet de simplifier la conception de la turbine. La simplification qui en résulte occasionne une suppression des freins aérodynamiques en bout des pales de l'éolienne. La figure I.17 montre quelques applications de la MSAP aux grandes puissances [ AH20].



(a) Automotrice à grande vitesse



(b) Traction ferroviaire



(c) Eolienne



(d) propulsion navale

Figure (I.17). Exemples d'application de la MSAP aux grandes puissances [AH20].

## I.7 Principe de L'autopilotage des Machines Synchrones

Pour les applications à vitesse variable, la machine synchrone pilotée en boucle ouverte de vitesse et de position présente un comportement très instable. Une variation brutale de charge, crée des oscillations de couple et de vitesse très peu amorties qui provoquent généralement le décrochage de la machine. L'objectif, dans un premier temps, est d'étudier le comportement de la machine par une mise en équation simple, basée sur la résolution de l'équation fondamentale de la dynamique appliquée aux systèmes en rotation. Cette approche, peu connue, nous amènera naturellement, dans un second temps à envisager une solution plus « robuste », bien connue sous le

nom d'autopilotage, dont le principe est de maintenir les champs statorique et rotoriques en parfait synchronisme. [MF14]

Donc le rôle d'autopilotage est de générer les grandeurs de référence de l'onduleur de façon à lier la fréquence des courants délivrées par l'onduleur à la fréquence de rotation du moteur.

## **I.8 Différents modes d'alimentation des MSAP**

La machine synchrone peut être alimentée en tension ou en courant. La source doit être réversible pour un fonctionnement dans les quatre quadrants (moteur/générateur dans les deux sens de rotation). Les convertisseurs alternatif/continu de l'électronique de puissance, sont utilisés dans des domaines d'applications variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courants alternatifs. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée sur le développement des composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides [LAB09].

### **I.8.1 Onduleur de tension**

La commande d'un moteur synchrone peut se faire aussi à partir d'un convertisseur statique alimenté par une source de tension continue constante. Les onduleurs de tension permettent d'imposer aux enroulements statorique de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglables en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique (GTO, transistors bipolaire, MOSFET, IGBT, etc.). Dans les années 90, le transistor IGBT a complètement relancé la construction des onduleurs nécessaires à l'alimentation des moteurs à courant alternatif asynchrones et synchrones. Facile à commander, sa grille étant assimilable à un circuit de charge d'un condensateur, il présente les principaux avantages d'un transistor bipolaire, et il se prête aussi particulièrement bien à la mise en parallèle. Pour réaliser un onduleur triphasé classique alimenté par une source de tension continue (munie d'un filtrage capacitif), et dont le récepteur est une charge alternative qui se comporte comme une source de courant (le stator d'une machine à courant alternatif est inductif), on a besoin de 6 interrupteurs bidirectionnels en courant. Il faut aussi disposer donc de diodes rapides et performantes, montées en parallèle inverse avec les transistors IGBT. Cette configuration permet d'imposer aux moteurs des courants présentant une faible distorsion harmonique et conduit ainsi à l'élaboration des systèmes d'entraînements à base de moteurs à courant alternatif à hautes performances. Les techniques dites (Modulation de Largeur d'Impulsion MLI) ou (Pulse Width Modulation PWM, dans le jargon anglo-saxon) sont utilisées

.Ces stratégies de commande des onduleurs s'appuient sur les performances en fréquence de découpage permises par les composants électroniques utilisés [AA05], [FGR95].

### **I.8.2 Alimentation par courants sinusoïdaux**

Pour réaliser des courants de référence de forme sinusoïdale, il faut disposer d'un codeur de la position du rotor possédant une bonne définition angulaire ou bien, plus rarement, faire l'estimation de celle-ci. En pratique, les courants de référence de forme sinusoïdale sont obtenus au moyen de mémoires adressées à partir du codeur de position et lues par des convertisseurs numérique-analogique. L'amplitude de ces courants peut être ajustée en changeant la valeur de la tension de référence de ces convertisseurs. Les courants réels circulant dans la machine sont mesurés par des capteurs qui doivent nécessairement posséder un isolement galvanique. Pour mettre en œuvre le système de contrôle des courants qui élabore la commande des interrupteurs de l'onduleur à partir de la comparaison des courants réels et des courants de références [BB12][RS08].

### **I.8.3 Alimentation par courants de forme rectangulaire**

Les courants ont la forme de créneaux de  $120^\circ$  de largeur. Il y a toujours deux phases alimentées simultanément en série par un courant constant. Tous les  $60^\circ$ , le courant est commuté d'une phase à l'autre comme représenté sur la figure (I.18). Le couple apparait donc comme la juxtaposition des courbes de couple à courant constant développé par la machine pendant les différentes séquences de fonctionnement. Il est clair que si l'on cherche à minimiser les ondulations du couple résultant, les courbes de FEM de deux phases alimentées à courant constant doivent avoir une variation trapézoïdale en fonction de la position du rotor, avec un palier de largeur suffisante (plus de  $60^\circ$ ). On peut également noter que si le critère essentiel est la minimisation des ondulations du couple, les courants doivent être centrés par rapport aux courbes des FEM. Cela revient à un décalage nul entre les ordres de commutation et les FEM.

La différence essentielle entre ce type d'alimentation et l'alimentation par courants sinusoïdaux réside dans le fait qu'elle nécessite un capteur de position du rotor plus simple. En effet, pour générer des courants rectangulaires, seule la position du rotor au moment des commutations est nécessaire. [FM12]

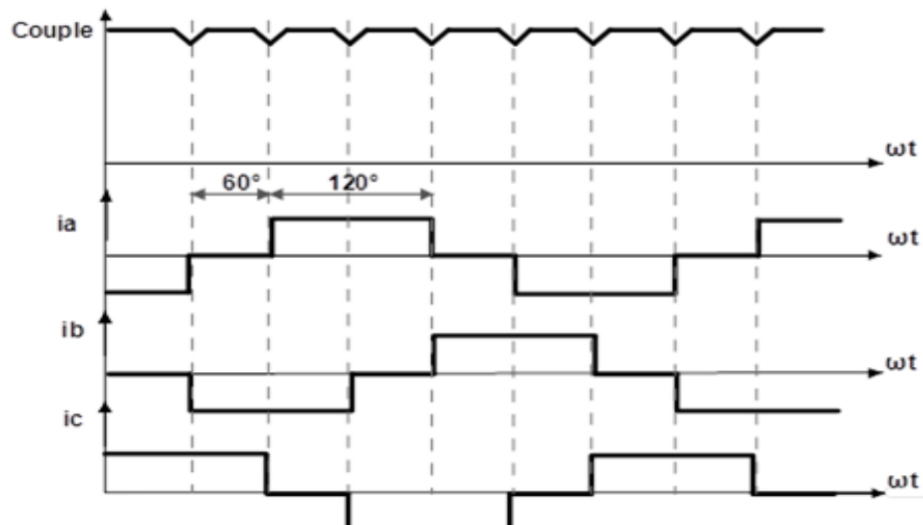


Figure (I.18). Alimentation par courants rectangulaires et couple résultant.

## I.9 Conclusion

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont des machines électriques largement utilisées dans diverses applications. Elles offrent une haute densité de puissance, une efficacité élevée, une réponse dynamique rapide, une compacité et une légèreté. Les MSAP nécessitent moins d'entretien et offrent des possibilités de contrôle avancé. Malgré quelques défis, les MSAP continuent de trouver de nouvelles applications grâce aux progrès technologiques. En conclusion, les MSAP sont des solutions attrayantes pour des applications exigeantes en termes de performances, d'efficacité et de compacité, Dans cette étude, nous nous concentrons sur les machines synchrones à double excitation.

# **Chapitre II : Modélisation par Eléments Finis deMSAP à Double Excitation**

## II.1. Introduction

Il existe de nombreuses équations aux dérivées partielles qui décrivent le comportement des phénomènes électriques et magnétiques et leur propagation dans l'espace, parmi lesquelles les équations de Maxwell. Ces équations ont été développées par le physicien britannique James Clerk Maxwell au 19<sup>ème</sup> siècle et sont l'un des principaux piliers de la théorie de l'électromagnétisme. Pour résoudre ces équations nous utilisons la technique de calcul par éléments finis. Dans ce chapitre, nous évoquerons ces équations et expliquerons la méthode de calcul des éléments finis.

## II.2. Les Equations de Maxwell

### III.2.1. Première équation de Maxwell

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{Maxwell-Gauss}) \quad (\text{II. 1})$$

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

$\rho$ : Densité de charges volumiques [C/m<sup>3</sup>]

Cette relation correspond à un « terme de source » : la densité de charge électrique est une source de champ électrique. Pour le vecteur d'induction électrique, il représente la façon dont le champ électrique influe sur l'organisation de ces charges dans un matériau donné [LH94].

### II.2.2. Deuxième équation de Maxwell

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{Maxwell-Faraday}) \quad (\text{II. 2})$$

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

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

Cette équation traduit le phénomène fondamental d'induction électromagnétique où toute variation de champ magnétique dans le temps génère un champ électrique. Sa forme intégrale est la loi de Faraday

$$E = - \frac{d\phi}{dt}$$

$E$  et  $\Phi$  sont respectivement la force électromotrice d'induction dans un circuit électrique et le flux magnétique à travers ce circuit [14].

### II.2.3. Troisième équation de Maxwell

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Maxwell - Flux}) \quad (\text{II. 3})$$

Le flux du champ magnétique à travers une surface fermée est toujours nul (caractère conservatif).

### II.2.4. Quatrième équation de Maxwell

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (\text{Ampère-Maxwell}) \quad (\text{II. 4})$$

$\vec{H}$ : Vecteur champ magnétique [At/m]

$\vec{j}$ : Vecteur densité de courant [A/m<sup>2</sup>]

Le champ magnétique rend compte du déplacement des charges électriques. Autrement, la circulation des courants électriques est à l'origine de la production de l'excitation magnétique.

## II.3. Hypothèses simplificatrices

En électrotechnique, les fréquences utilisées sont inférieures aux radios fréquences qui sont de l'ordre de 10<sup>12</sup> Hz. D'où les courants de déplacements sont faibles, ce qui revient à négliger le terme  $(\frac{\sigma \vec{D}}{\sigma t})$  devant le terme de conduction  $\sigma \vec{E}$  [ER99].

En considérant ces hypothèses, les équations de Maxwell deviennent :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \rho \quad (\text{II. 5})$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{II. 6})$$

$$\operatorname{rot}(\vec{H}) = \vec{j} \quad (\text{II. 7})$$

## II.4. Relations du milieu

### II.4.1. Relations magnétiques

Elles expriment les relations qui existent entre le champ magnétique  $\vec{H}$  et l'induction magnétique, à travers la perméabilité magnétique ainsi que celle entre l'induction électrique  $\vec{D}$  et le champ électrique  $\vec{E}$ , à travers la permittivité électrique  $\varepsilon$ . [AB20]

$$\vec{B} = \mu(H) \cdot \vec{H} \quad (\text{II. 8})$$

$$\vec{D} = \varepsilon(\vec{E}) \cdot \vec{E} \quad (\text{II. 9})$$

Dans le cas linéaire nous avons :

$$\mu = \mu_0 \mu_r = C^{te} \quad (\text{II. 10})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = C^{te} \quad (\text{II. 11})$$

$\mu$ : Perméabilité magnétique absolue (H/m)

$\mu_0$ : Perméabilité magnétique du vide  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  (H/m)

$\mu_r$ : Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.

$\varepsilon$ : Permittivité électrique (F/m)

$\varepsilon_0$ : Permittivité électrique du vide  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$  (F/m)

$\varepsilon_r$ : Permittivité relative du milieu considéré

### II.4.2. Relation diélectrique

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

$\varepsilon_0$ : Permittivité diélectrique du vide [F/m]

$\varepsilon_r$ : Permittivité diélectrique du milieu

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ : Permittivité diélectrique absolue [F/m]

### II.4.3. Relations de passages

A l'interface entre deux milieux différents respectivement (1) et (2), les champs de vecteurs doivent vérifier certaines conditions dites relations de passages. Elles s'énoncent comme suit [AB20]

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique

$$E_{t1} - E_{t2} = 0 \quad (\text{II. 13})$$

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique

$$B_{n1} - B_{n2} = 0 \quad (\text{II. 14})$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique

$$H_{t1} - H_{t2} = K \quad (\text{II. 25})$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique

$$D_{n1} - D_{n2} = \sigma_s \quad (\text{II. 16})$$

$K$  : Densité de courant porté par la surface de séparation.

$\sigma_s$  : Densité de charge électrique portée par la surface de séparation.

### II.5.1. La Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis a connu un essor considérable dans ces vingt dernières années [MR86].

Elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles [BT16].

La MEF est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. En plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes [OHUM].

Dans beaucoup de domaines, elle est la plus utilisée de nos jours. [YA16]

## II.5.2. Principe

La méthode des éléments finis, est un outil numérique très puissant, est très utilisé dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini [MSF08].

Le principe de cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage).

C'est une étape très importante puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci qui soit les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que [MO10]:

1. des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions.
2. des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

## II.5.3. Avantages de la M.E.F

» La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la M.E.F. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.

» Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques ce qui simplifie

Grandement la résolution de celui-ci.

» La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte

De l'introduction des conditions aux limites.

» La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie.

» De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible, et par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la M.E.F en détail [MOMR11].

#### **II.5.4. Inconvénients de la M.E.F**

» Dans les problèmes de calcul de champs électriques présentant un domaine spatial infini, L'établissement de la frontière artificielle peut causer certaines difficultés dans la réalisation d'un programme simple. D'une part, celle-ci doit être beaucoup plus vaste que le domaine d'étude, ce qui engendre un temps de calcul (en ce qui concerne le maillage) beaucoup plus important que pour des domaines finis.

» D'autre part, le choix de cette frontière à une grande importance dans la précision des calculs et son influence sur celle-ci doit être pris en compte dans tout programme de ce type.

» Il a été dit que la M.E.F était une méthode flexible car elle s'adapte facilement aux différentes géométries, mais ce n'est pas le cas du maillage car celui-ci doit être entièrement refait si une modification sur une partie de la géométrie du problème considéré intervient.

» L'utilisation de la M.E.F pour la résolution d'un problème donné nécessite la connaissance parfaite de la géométrie du problème mais aussi des conditions aux limites ; ce qui n'est pas toujours le cas.

» Une fois le potentiel connu en chaque nœud, il faut procéder à un autre calcul numérique pour déterminer le champ électrique en tout point ce qui peut engendrer d'autres erreurs.

La méthode des éléments finis utilise une approximation par morceau de la fonction inconnue pour résoudre une équation différentielle.

On peut aussi utiliser les équivalences physiques pour chercher la solution d'une équation aux dérivées partielles.

La méthode de simulation de charges en est une bonne illustration [AB20].

#### **II.5.5. Logiciel éléments finis FEMM**

C'est un logiciel libre et gratuit, disponible sur le réseau internet [SFEMM]. Ce logiciel est devenu un outil très convoité par les chercheurs.

La méthode qu'il utilise est celle des éléments finis, méthode appliquée aux structures électromagnétique, électrostatique...etc.

Le logiciel FEMM est composé de trois modules essentiels, un module d'édition qui permet de définir le type de problème, de tracer la géométrie, de définir les différents milieux, ainsi que les conditions aux limites, et de mailler la structure proposée (préprocesseur).

Un deuxième module permet de résoudre le problème (processeur). Et un troisième module qui permet d'exploiter les résultats du calcul (post processeur). Le logiciel est utilisé généralement en compagnie d'un outil de programmation (LUA SCRIPTING). Composantes principales logiciel :

- » Éditeur : édition géométrie du problème, propriétés des matériaux utilisés et conditions Aux frontières du domaine d'étude.
- » Manilleur Éléments Finis : Discrétisation spatiale du domaine d'étude en triangles (Maillage éléments finis).
- » Processeur : Résolution des équations locales aux dérivées partielles discrétisées sur tout le domaine d'étude en tenant compte des conditions imposées aux frontières du domaine d'étude.
- » Post-Processeur : Affichage & Traitement des résultats [AB20]

Domaines d'application :

Conception de transformateurs électriques et de circuits magnétiques.

Analyse des moteurs électriques et des générateurs.

Étude des dispositifs électromagnétiques, tels que les actionneurs et les relais.

Simulation des systèmes de bobinage.

Analyse des phénomènes de magnétisme dans les matériaux ferromagnétiques.

Modélisation par éléments finis : FEMM utilise la méthode des éléments finis pour diviser un problème complexe en petits éléments plus simples, ce qui permet de résoudre numériquement les équations électromagnétiques dans chaque élément. Cette approche permet de modéliser efficacement des structures complexes [SFEMM].

### **II.5.6. Les domaines d'application**

- » 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 [RF16].

### **II.6. Conclusion**

La modélisation de la (MSDE) est une étape cruciale dans la compréhension et l'optimisation de son fonctionnement. Cette modélisation permet de représenter de manière précise et réaliste les caractéristiques électromagnétiques et mécaniques de la machine. La modélisation de la machine synchrone à double excitation implique la résolution des équations de Maxwell pour décrire les champs magnétiques et électriques à l'intérieur de la machine. Cette modélisation peut être réalisée en utilisant la méthode des éléments finis, qui permet de discrétiser le domaine de la machine en éléments finis et de résoudre numériquement les équations sur ces éléments.

Grâce à cette modélisation, il est possible d'analyser et de prédire le comportement de la (MSDE) dans différentes conditions de fonctionnement. Cela permet de comprendre comment les différents paramètres, tels que les courants d'excitation, les aimants permanents, les bobinages statorique, affectent les performances de la machine.

# **Chapitre III : Modalisation par calcul de champ**

### III.1 Introduction

Il existe plusieurs façons de résoudre des équations aux dérivées partielles. Ces méthodes permettent de modéliser des géométries plus complexes et de prendre en compte des phénomènes physiques tels que la saturation des matériaux magnétiques, l'anisotropie des milieux, la présence de courants de Foucault induits dans les conducteurs soumis à des flux variables. Les méthodes de précision numérique les plus largement utilisées sont les méthodes d'équation intégrale aux limites, la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis. Dans notre travail, nous nous concentrerons sur la méthode des éléments finis, qui est l'une des méthodes numériques les plus utilisées.

Cette méthode est utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles qui décrivent le comportement électromagnétique des machines électriques.

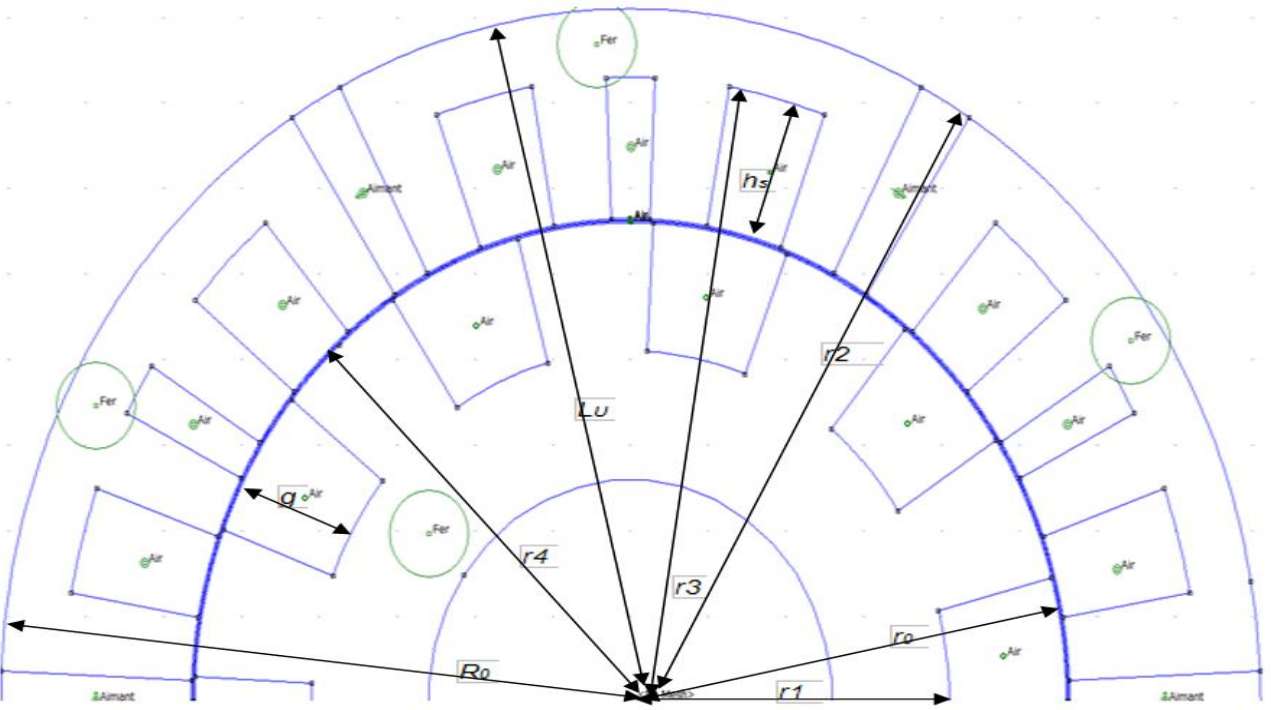
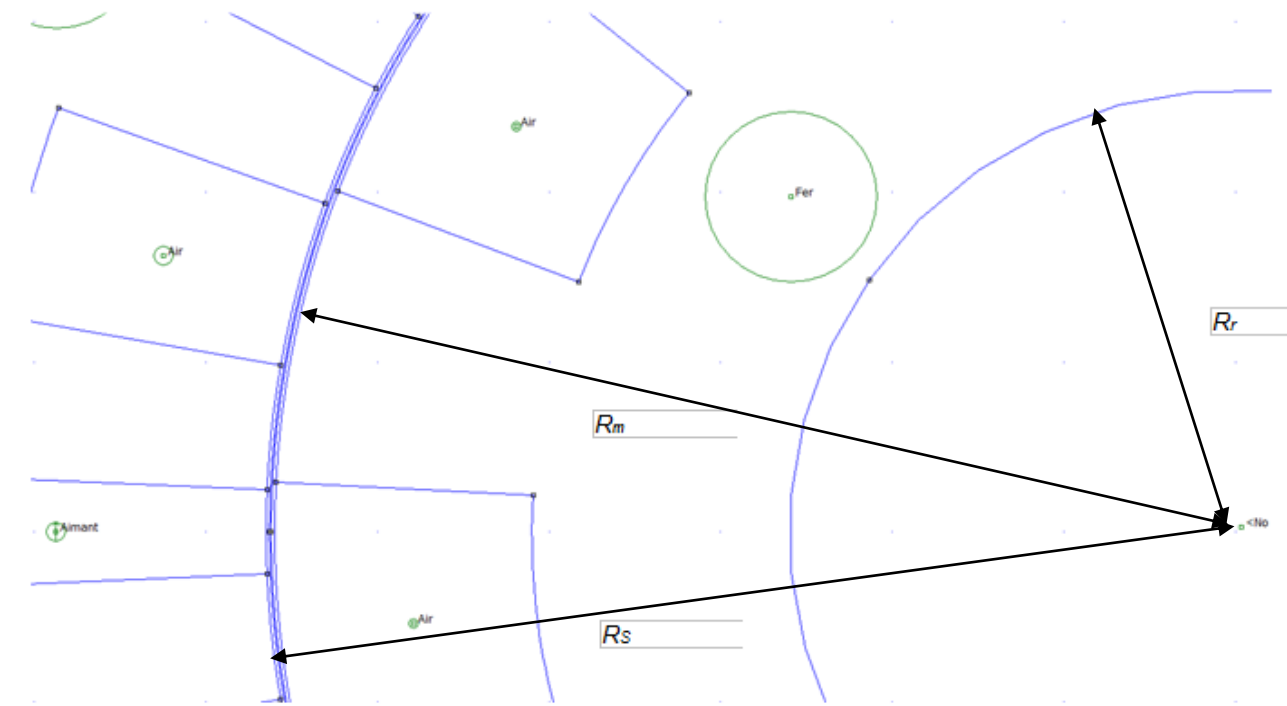
Dans ce chapitre, nous définissons la machine considérée, puis calculons les grandeurs électromagnétiques à l'aide de cette méthode.

### III.2 Paramètres de la machines étudié

Paramètres	Symboles	Valeur et unité
Induction rémanente (ferrite)	$B_r$	0.4T
Perméabilité relative des aimants	$\mu_r$	1
Nombre de paires de pôles	$p$	3
Nombre d'encoches du stator	$Q_s$	12
Nombre d'encoches du rotor	$N_r$	10
Nombre de conducteurs par encoche statorique	$N_c$	12 6
Courant de crête	$I_m$	12.50A
Courant d'excitation de l'électro-aimant	$I_f$	05.00A
Nombre de conducteurs par encoche rotorique	$N_f$	10
Rayon extérieur de l'encoche rotorique	$r_o$	40.80mm

Rayon intérieur de l'encoche rotoriques	$r1$	27.80mm
Rayon extérieur de l'aimant	$r2$	40.00mm
Rayon extérieur de l'encoche de stator	$r3$	49.00mm
Rayon intérieur de l'encoche de stator	$r4$	58.00mm
Rayon externe de stator	$R_0$	70.00mm
Rayon de la surface intérieure du stator	$R_s$	45.00mm
Rayon de la surface externe du rotor	$R_m$	44.80mm
Rayon de la surface interne du rotor	$R_r$	15.00mm
Largeur de l'entrefer	$g$	00.20mm
Hauteur de le l'encoche statorique	$h_s$	09.00mm
Longueur utile de la machine	$L_U$	57.00mm
Ouverture des encoches statorique	$C$	14°
Ouverture des encoches rotoriques	$C_r$	14°
Ouverture de la semi ouverture des encoches rotoriques	$dr$	08°
Ouverture de la semi- ouverture des aimants	$b$	12°
Ouverture de la semi ouverture des encoches statorique	$d$	08°
Ouverture proportionnelle de l'aimant	$a$	2/9 %

Table (III.1). Paramètres de la machines MSDE



### III.3. Présentation de la machine étudiée

Le type de la machine que nous abordons dans notre travail (Figure III.19, Figure III.20, Figure III.21), est celui des (MSDE). Le principe des structures à double excitation est basé sur la combinaison de deux sources de flux magnétiques d'excitation : des aimants permanents et des bobines d'excitation.

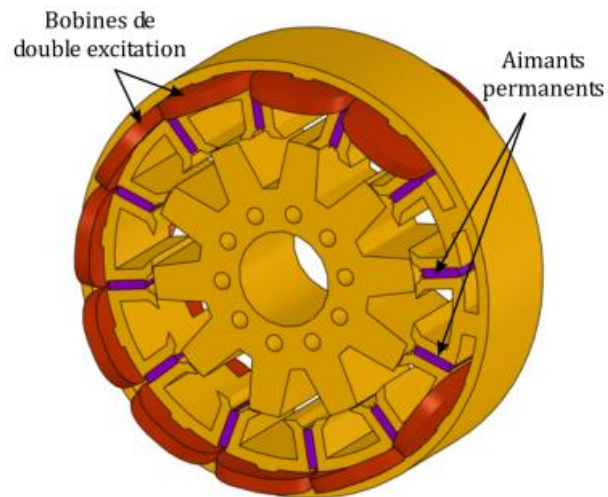


Figure (III.19). Machine à double excitation [SH08]

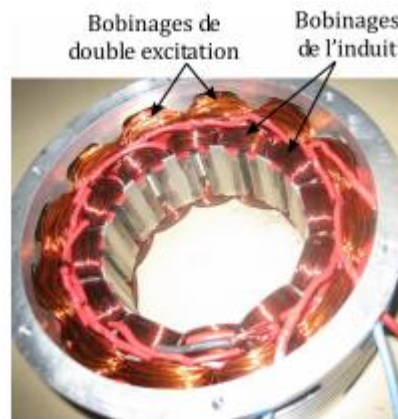


Figure (III.20). stator avec bobinage [SH08]

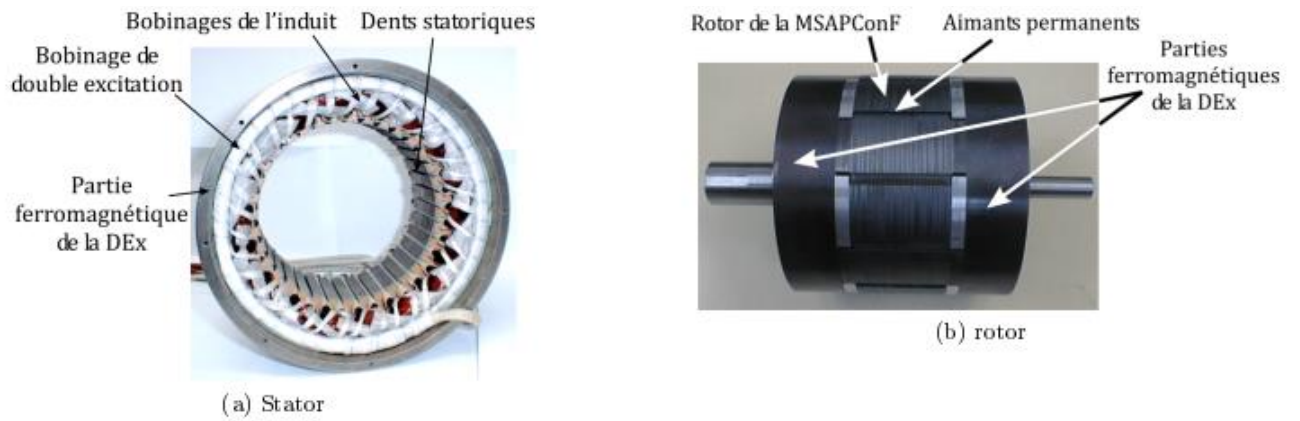


Figure (III.21). Machine à double excitation [SH08]

### III.3.1. Maillage et champ magnétique de la structure

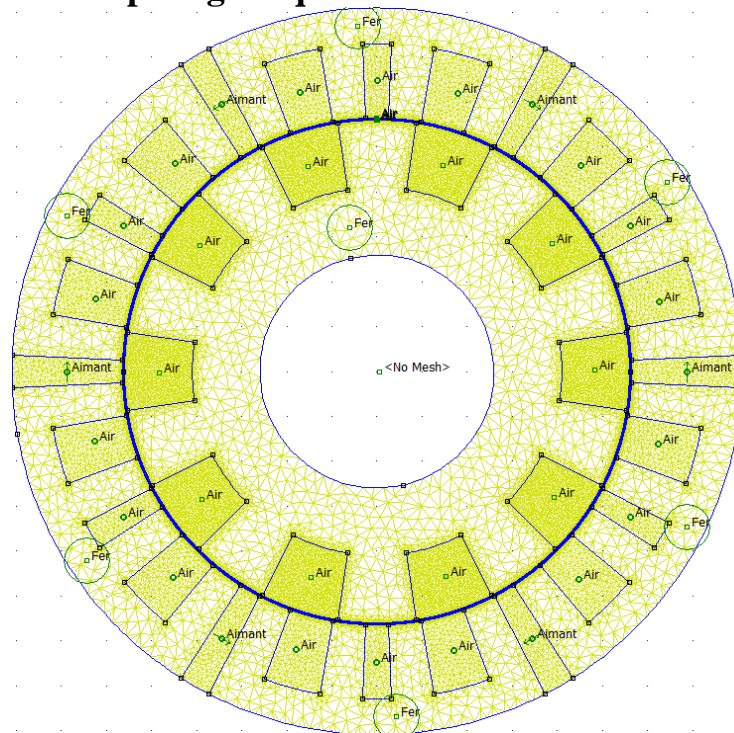


Figure (III.22). Représentation du maillage de la machine à double excitation

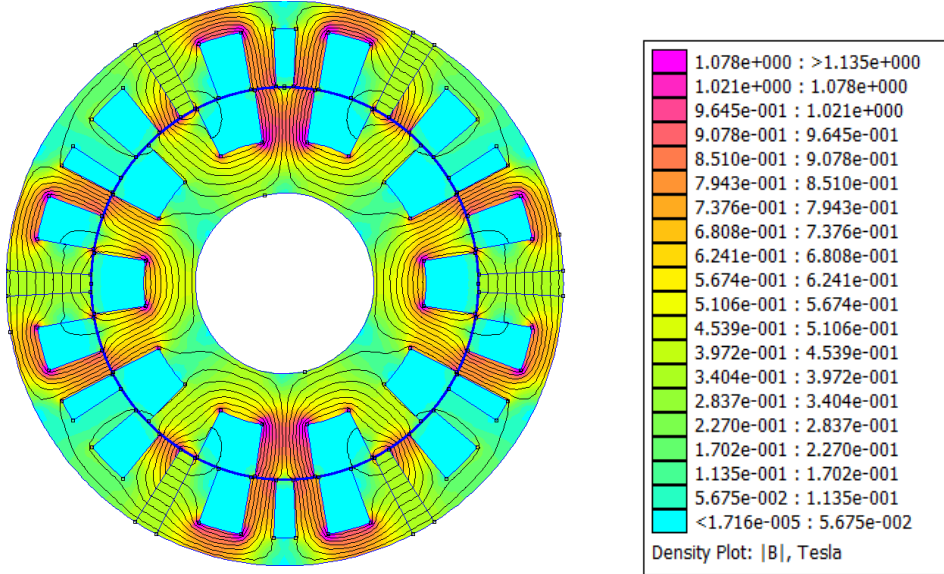


Figure (III.23). Représentation des lignes et distribution du flux magnétique pour MSDE

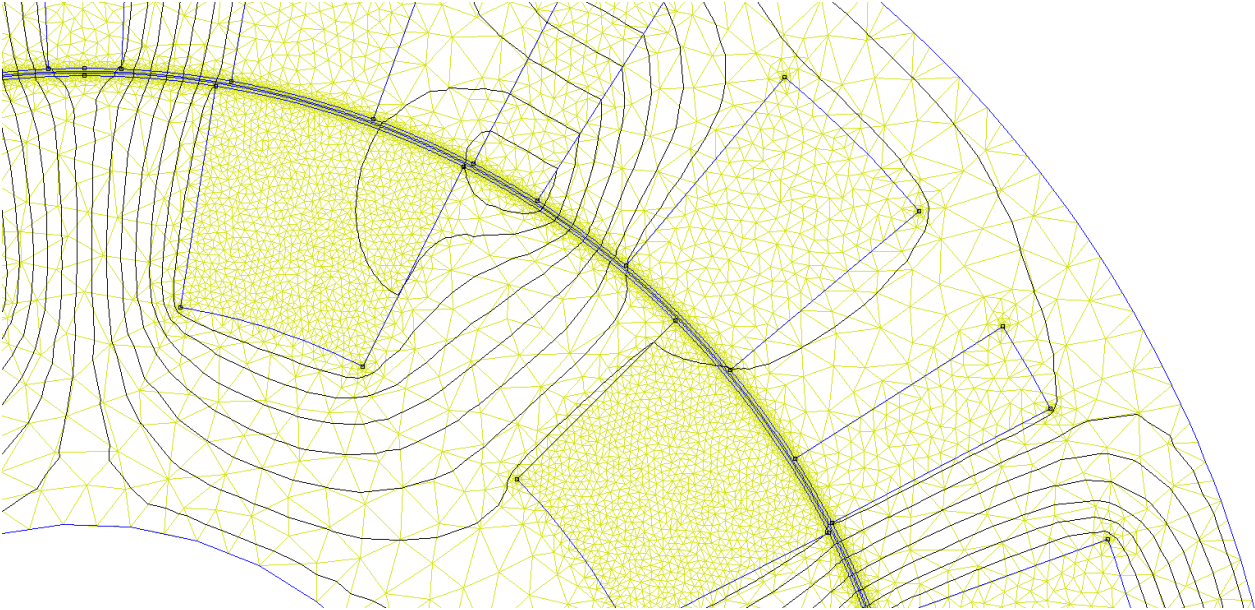
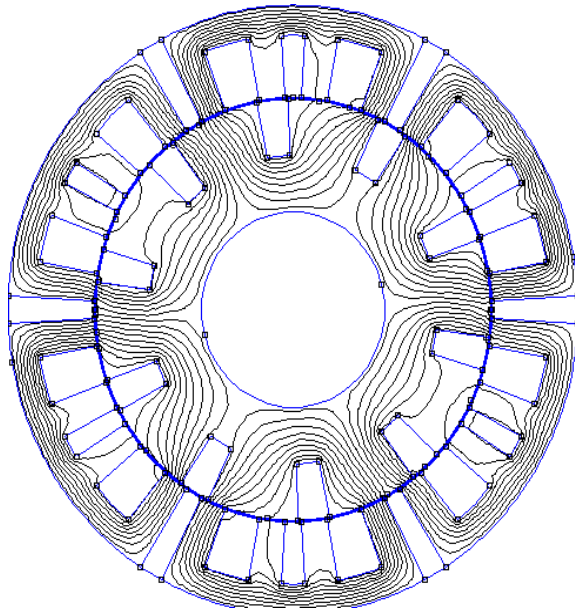


Figure (III.24). Illustration du maillage de la zone de l'entrefer.

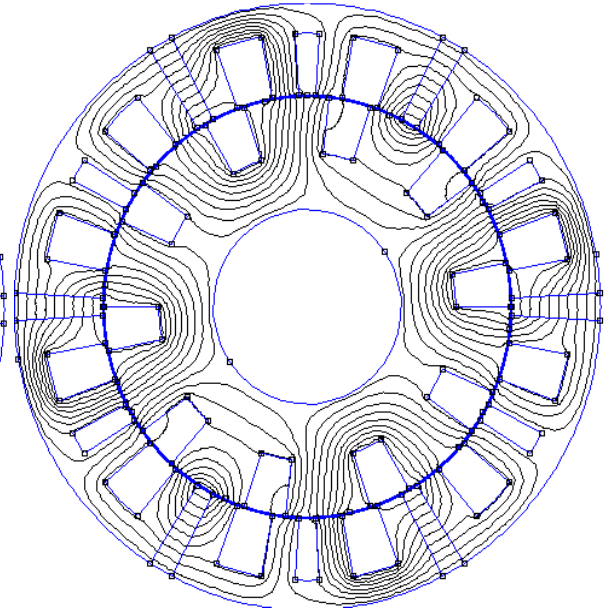
### III.4. Etude du champ dans l'entrefer

#### III.4.1. Cartes de champ magnétique

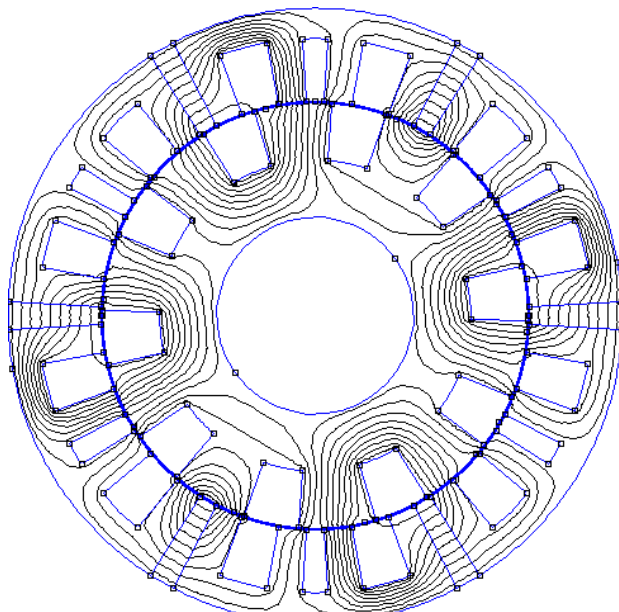
La figure (III.25) représente la distribution du champ magnétique pour différentes ouverture des encoches rotoriques.



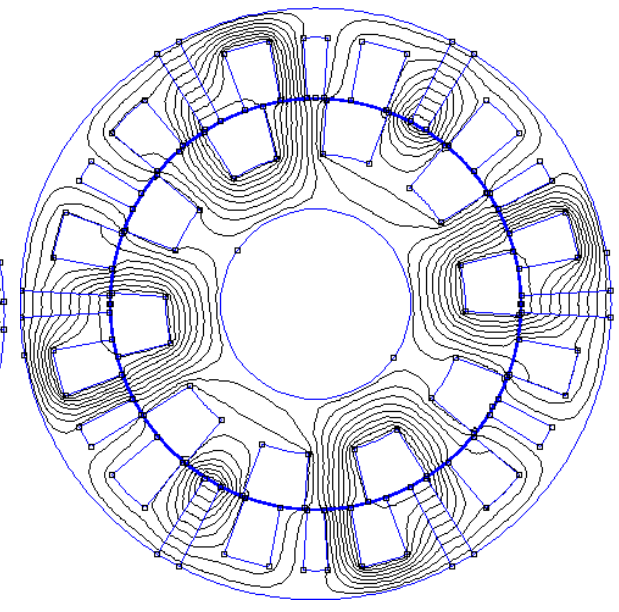
Ouverture d'encoche rotorique  $9^\circ$



Ouverture d'encoche rotorique  $12^\circ$



Ouverture d'encoche rotorique  $15^\circ$



Ouverture d'encoche rotorique  $18^\circ$

Figure (III.25). Distribution du champ magnétique pour différentes ouverture des encoches.

## III.5.RESULTATS DE SIMULATION

### Définition

L'induction tangentielle est liée à la création d'une force électromotrice dans un conducteur en mouvement par rapport à un champ magnétique, tandis que l'induction radiale se rapporte à la distribution spatiale des lignes de champ magnétique à partir d'une source centrale. Les deux concepts sont fondamentaux pour comprendre les phénomènes électromagnétiques et sont décrits par les lois de Faraday et de l'induction électromagnétique.

Les figures (III.26), (III.27), (III.28), (III.29), représentent la répartition de l'induction radiale et tangentielle on niveau du milieu de l'entrefer en fonction de la position angulaire pour différentes ouverture de l'encoche rotoriques.

### III.5.1.Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 9°)

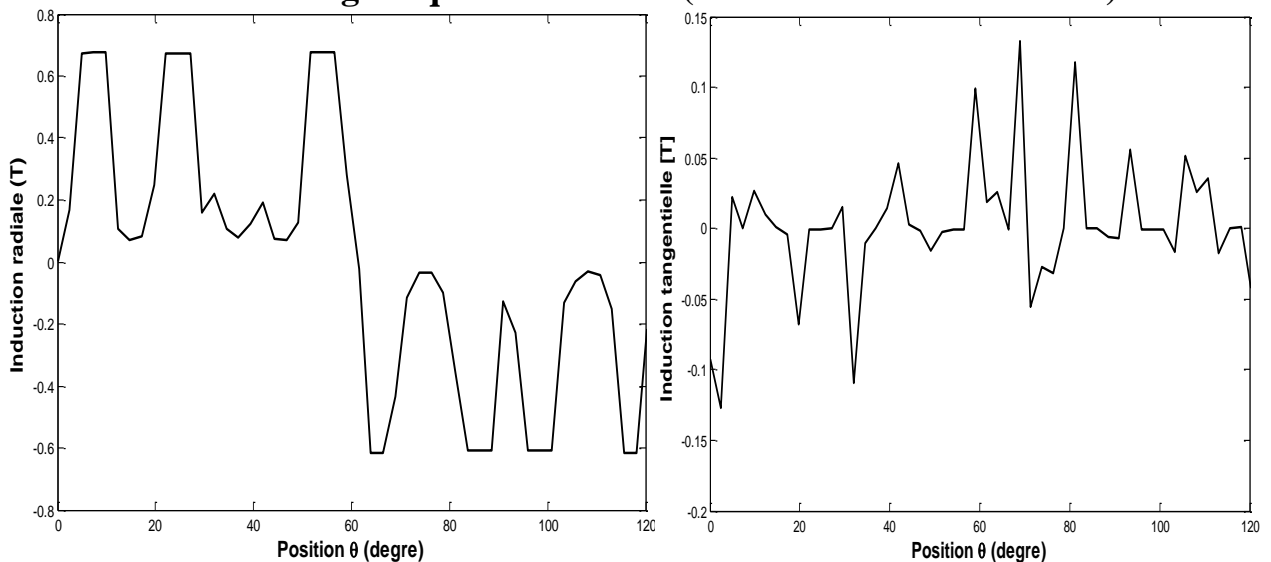


Figure (III.26). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 9°

### III.5.2. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches $12^\circ$ )

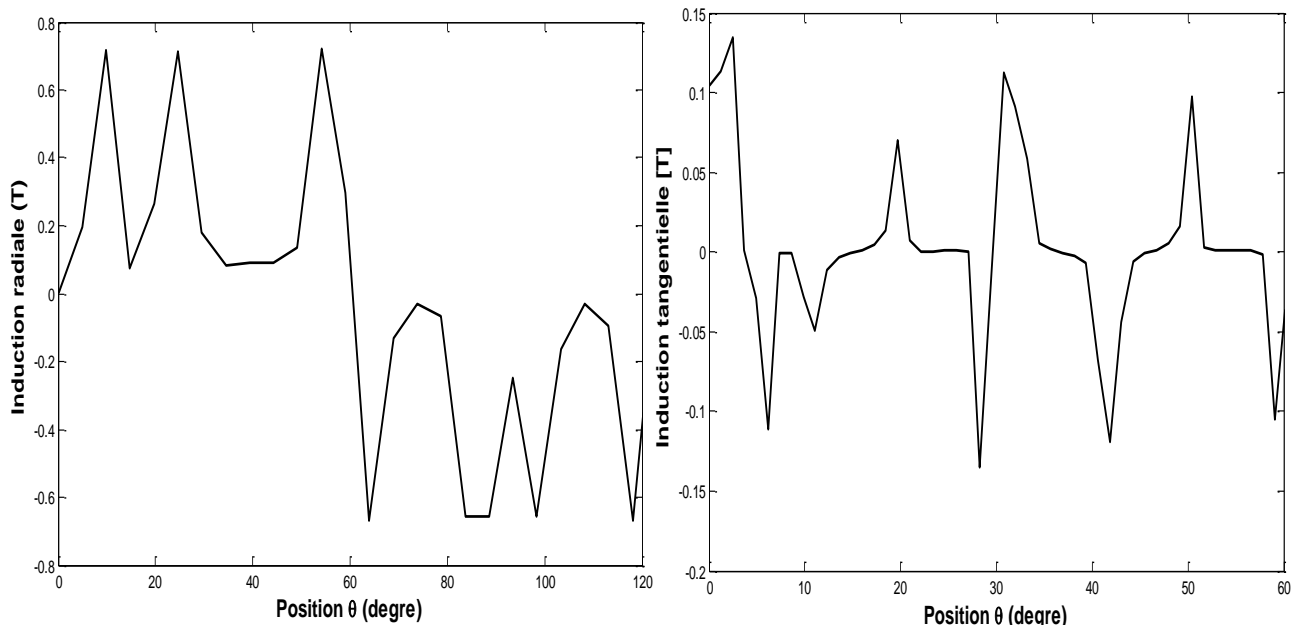


Figure (III.27). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture  $12^\circ$

### III.5.3. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches $15^\circ$ )

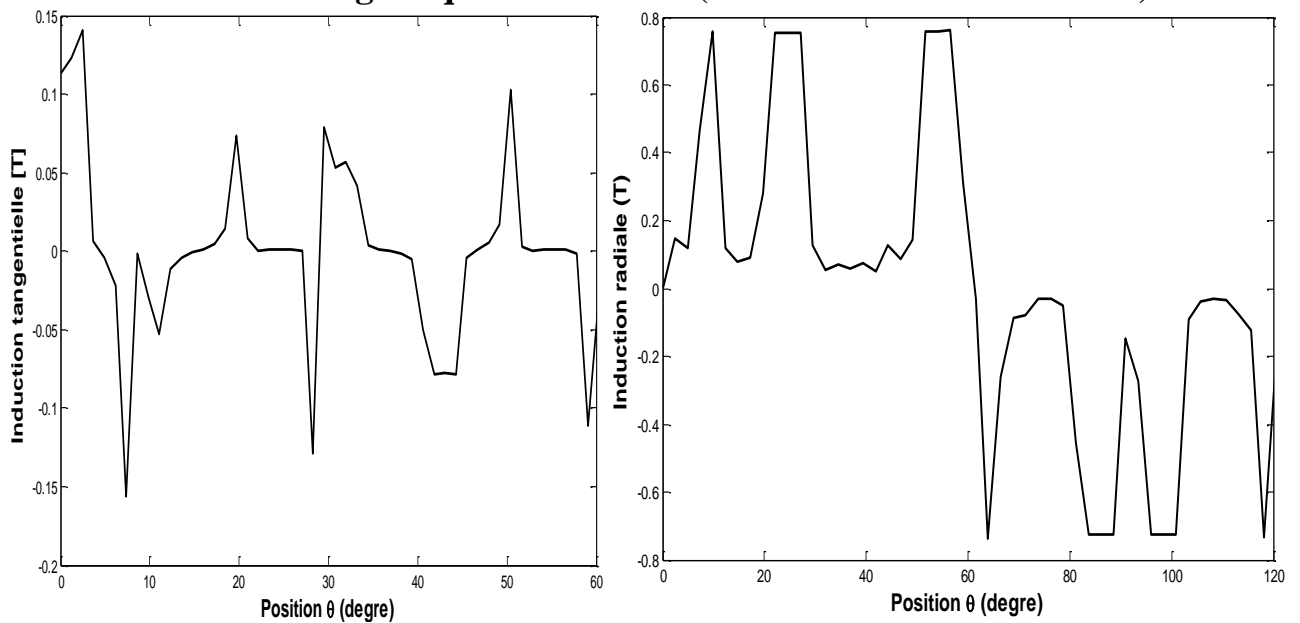


Figure (III.28). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture  $15^\circ$

### III.5.4. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 18°)

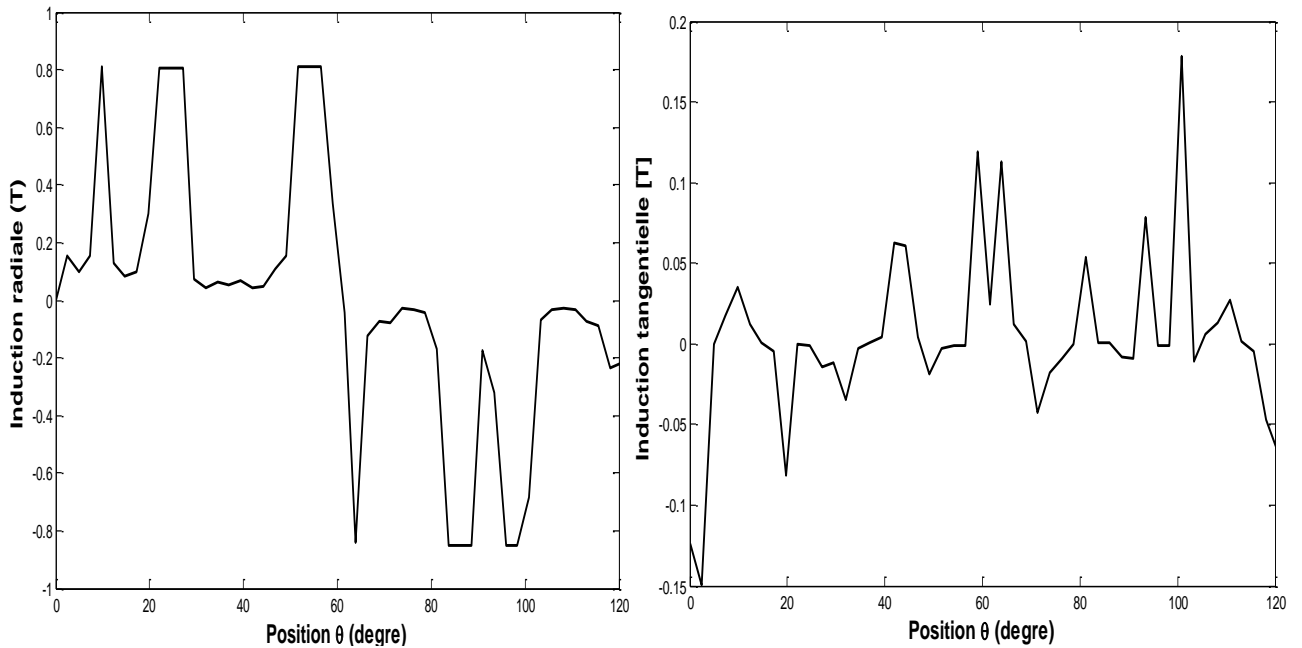


Figure (III.29). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 18°

## III.6. Etude sur les déferents couples

### III.6.1. Le couple de détente

La présence du couple de détente est une préoccupation majeure dans la conception des machines à aimants permanents, car il ajoute des harmoniques indésirables au couple pulsatoire. Ainsi les ondulations du couple ont principalement dues aux fluctuations de la distribution de champ dans l'entrefer qui dépend de la structure magnétique du moteur.

Le couple de détente des moteurs à aimants est toujours un sujet difficile pour l'analyse. Bien qu'il existe de nombreuses références, qui ont étudié le problème du couple de détente [AAM13].

### III.6.2. Le Couple de réluctance

Appelé aussi couple de saillance, il est dû aux variations des inductances des enroulements statorique en fonction de la position du rotor. Le calcul du couple de reluctance prend le même principe de calcul du couple de détente, mais en absence des aimants [AAM13].

### III.7. Influence de différente ouverture des encoches rotoriques sur les différents couples

La figure (III.30), (III.31), (III.32), (III.33), représentent et respectivement la distribution de couple détente et couple réductant au milieu de l'entrefer pour différente ouverture des encoche rotoriques ( $9^\circ$   $12^\circ$   $15^\circ$   $18^\circ$ ).

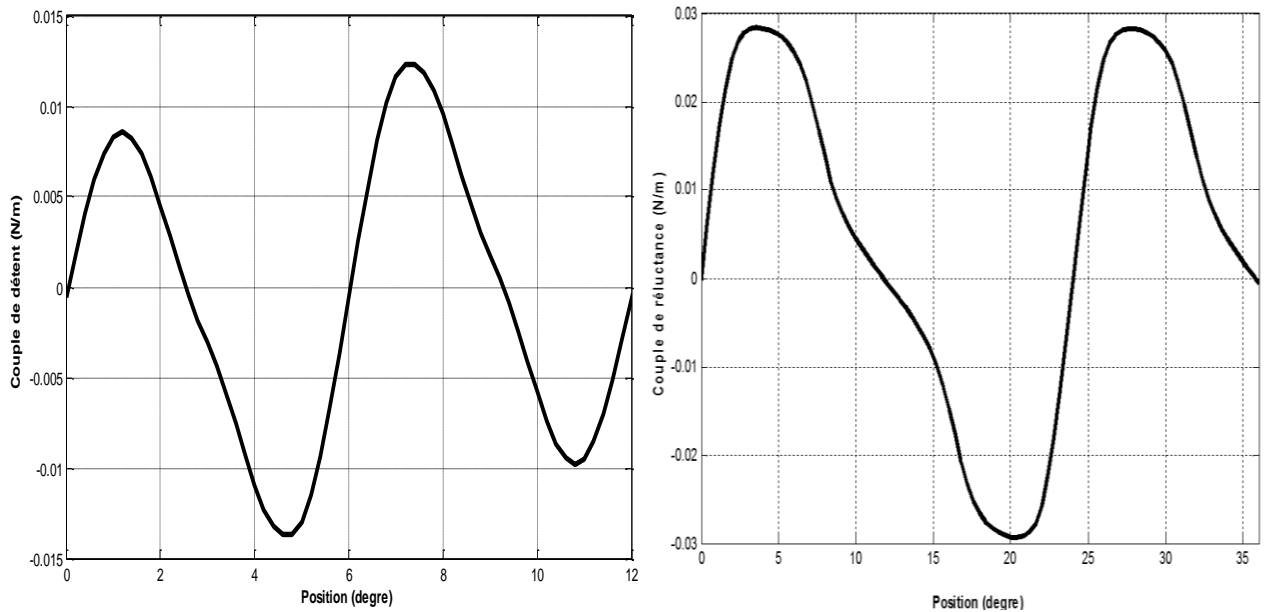


Figure (III.30). Répartition de couple de détente et réductant dans l'entrefer, cas une ouverture  $9^\circ$

Valeur maximale du couple détente pour une ouverture  $9^\circ$  égale à : 0.0125 (N/m)

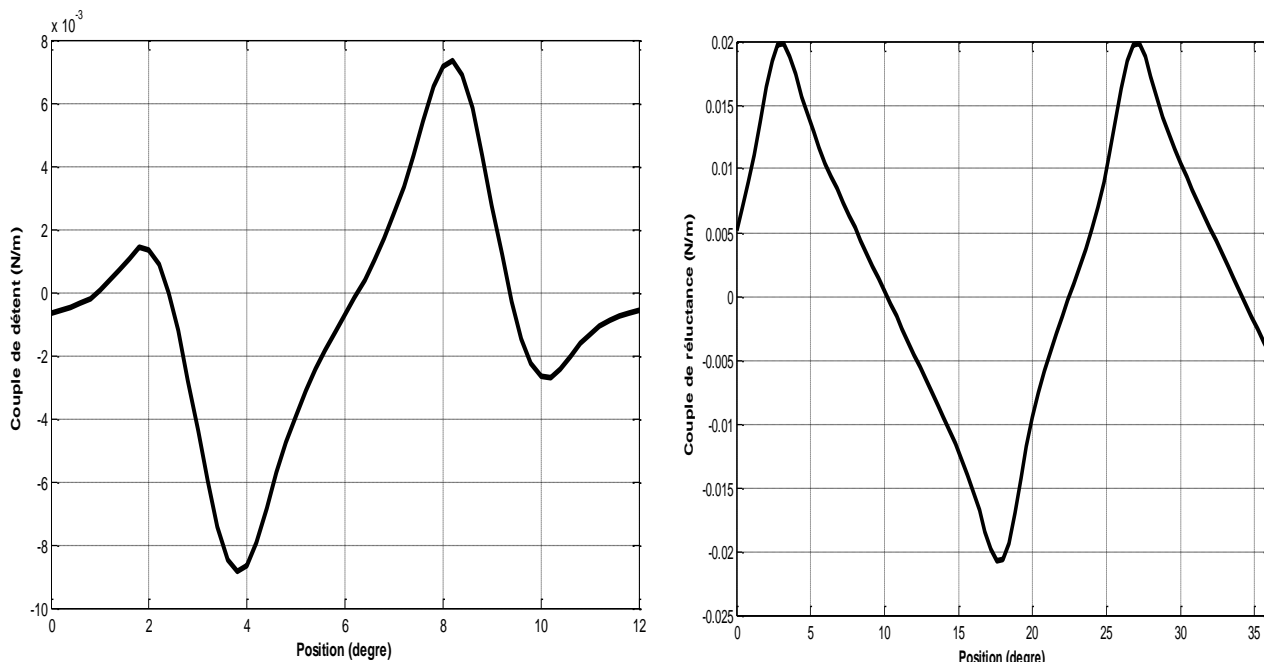


Figure (III.31). Répartition de couple de détente et réductant dans l'entrefer, cas une ouverture  $12^\circ$

Valeur maximale du couple détente pour une ouverture  $12^\circ$  égale à :  $0.0075$  (N/m)

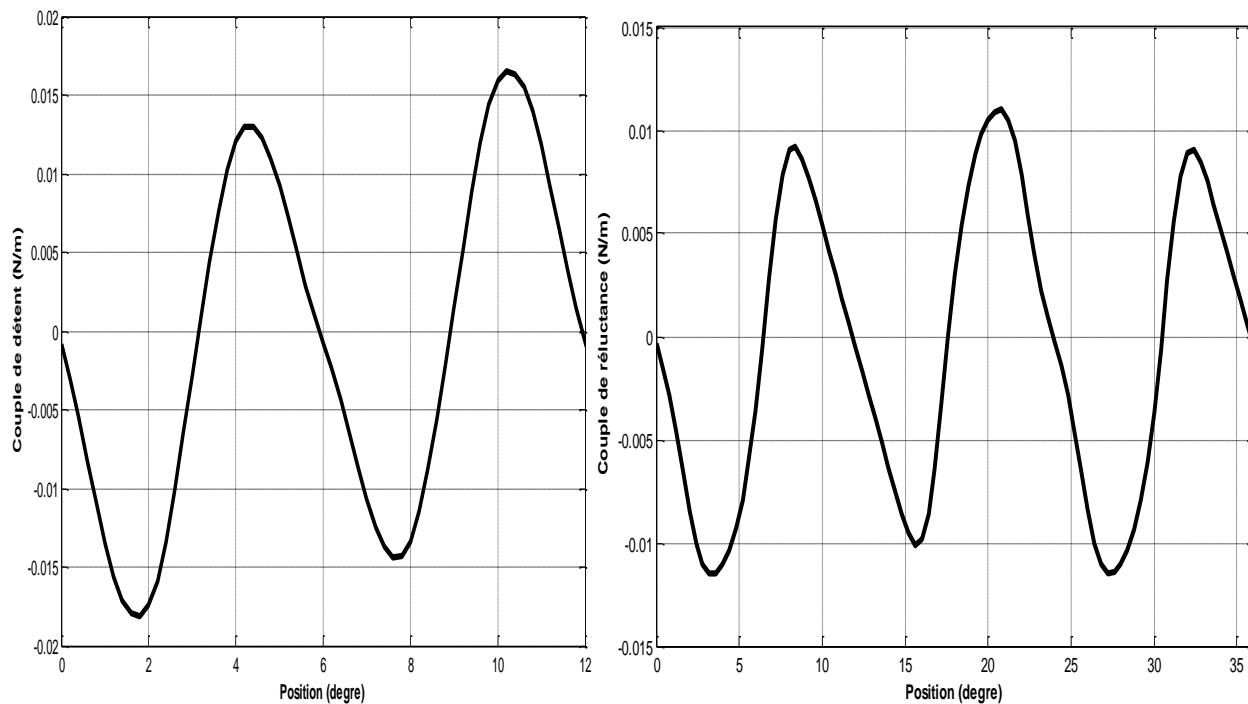


Figure (III.32). Répartition de couple de détente et réductant dans l'entrefer, cas une ouverture  $15^\circ$

Valeur maximale du couple détente pour une ouverture  $15^\circ$  égale à :  $0.016$  (N/m)

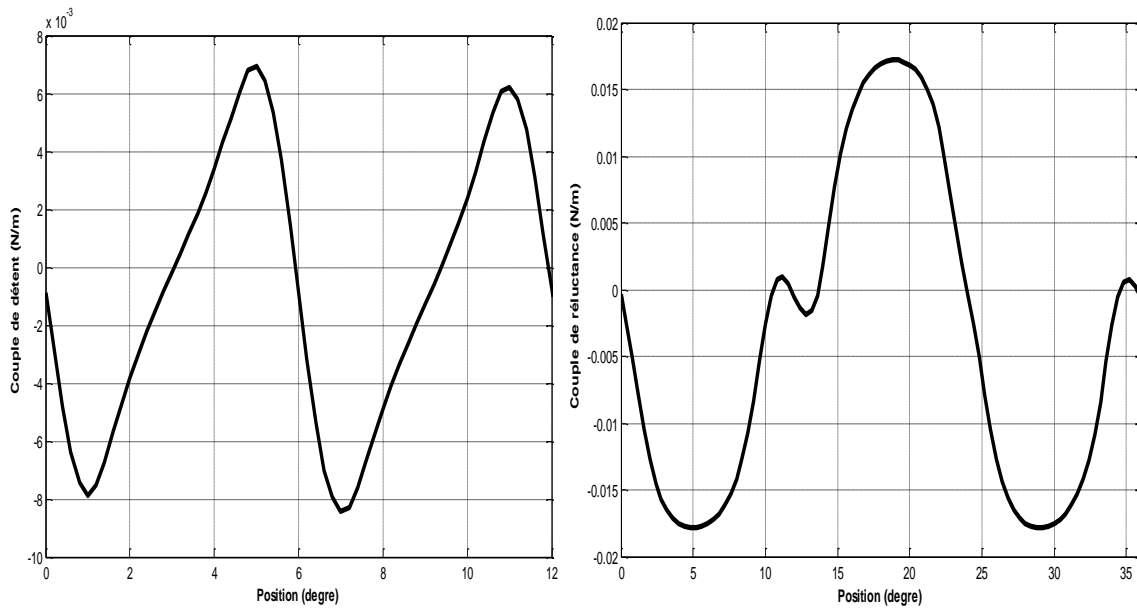


Figure (III.33). Répartition de couple de détente et réluctant dans l'entrefer, cas une ouverture  $18^\circ$   
 Valeur maximale du couple détente pour une ouverture  $18^\circ$  égale à:0.007 (N/m)

### III.8. Résultats du couple de détente

Ouverture des encoches (degré)	Max de couple détente (N.m)
$9^\circ$	0.0125
$12^\circ$	0.0075
$15^\circ$	0.016
$18^\circ$	0.007

Table (III.2). Résultats du couple de détente

### III.9. Comparaison du couple de détente



#### Commentaires

Les graphiques représentent les résultats de couple de détente pour les différentes encoches de la machine, où l'on remarque que la valeur du couple change en fonction du changement de l'ouverture de l'encoche. La valeur la plus élevée de l'ouverture de la structure est égale à 15° et la valeur la plus basse de l'ouverture de la structure est égale à 18°.

#### Remarque

La présence d'un couple de détente est une préoccupation majeure dans la conception des machines à aimants permanents car il ajoute des harmoniques indésirables au couple total, la meilleure structure est donc pour une ouverture de l'encoche égale à 18°.

### III.10.Méthode de calcul flux

Pour calculer le flux par phase  $\Phi$ , il nous faut définir le contour à intégrer.

L'expression du flux à travers le bobinage d'une phase est la suivante :

$$\Phi = \int \vec{b} \cdot d\vec{s} \quad (\text{III. 17})$$

Ou encore :

$$\phi = \oint_{c(s)} \vec{a} \cdot d\vec{l} \quad (\text{III. 18})$$

Pour un calcul en 2D, le flux à travers une spire d'une bobine logée dans les encoches d'indice 1 et 2 (Figure. III.33) décrit par l'équation (II. 34) se réduit à :

$$\phi = lu(A1 - A2) \quad (\text{III. 19})$$

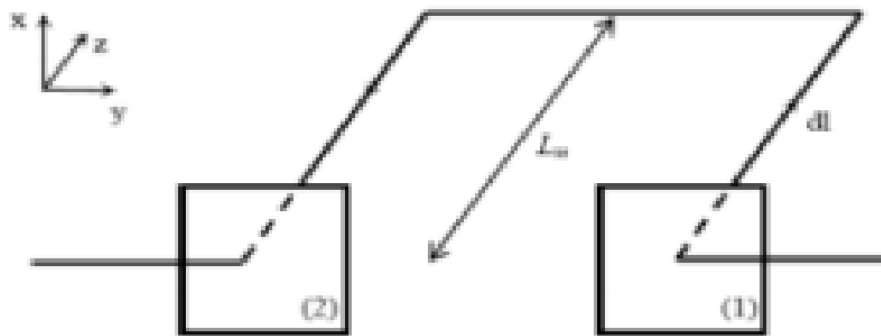


Figure (III.33). Calcul le flux unitaire dans une spire

Dans le cas des machines électriques, on doit considérer tous les conducteurs en série de la bobine d'une phase contenus dans la section d'une encoche. Sachant que la perméabilité de l'air est bien inférieure à celle du fer, on peut observer sur la Figure (III.34) que les lignes de champ ne passent pas par les encoches. De là, le flux dans l'encoche est pratiquement nul.

On en déduit que le potentiel vecteur magnétique est constant dans l'encoche. Le flux à travers la bobine d'une phase s'écrit :

$$\phi = \frac{1}{Sk} \int_{SK} \vec{a} \cdot d\vec{s} \quad (\text{III. 20})$$

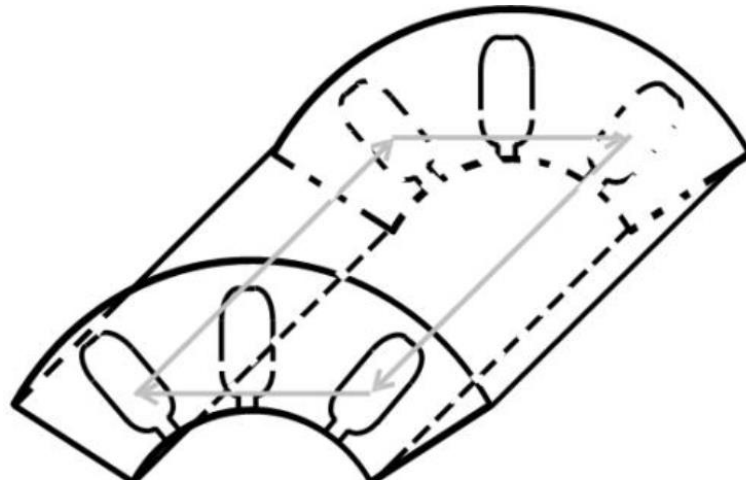


Figure (III.34). Contour d'intégration

### III.11. Calcul des flux magnétique

La figure (III.34), (III.35), (III.36), (III.37), représentent et respectivement Le flux magnétique au milieu de l'entrefer pour différente ouverture des ai l'encoche

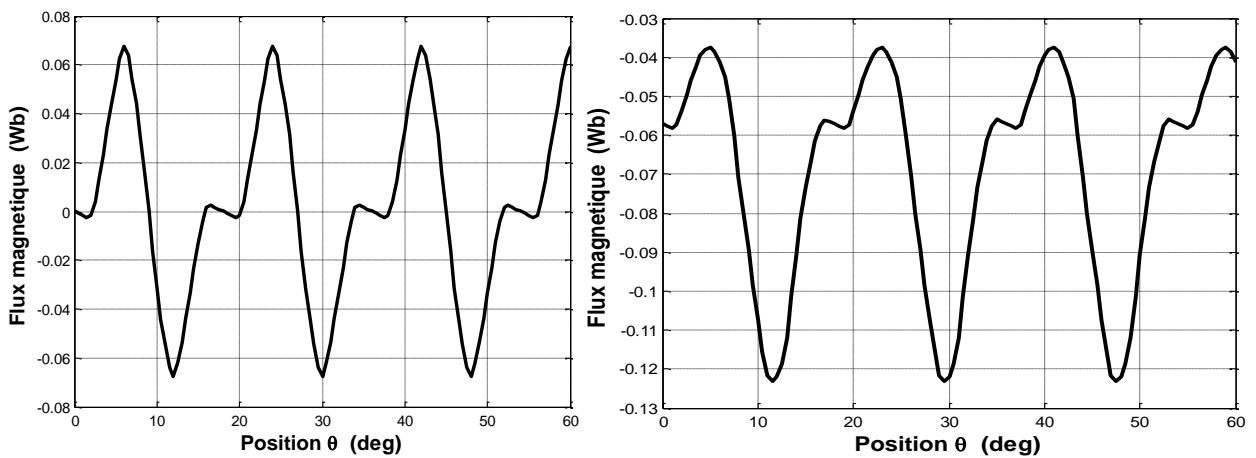


Figure (III.34). Flux magnétique d'une ouverture  $9^\circ$  Figure (III.35). Flux magnétique d'une ouverture  $12^\circ$

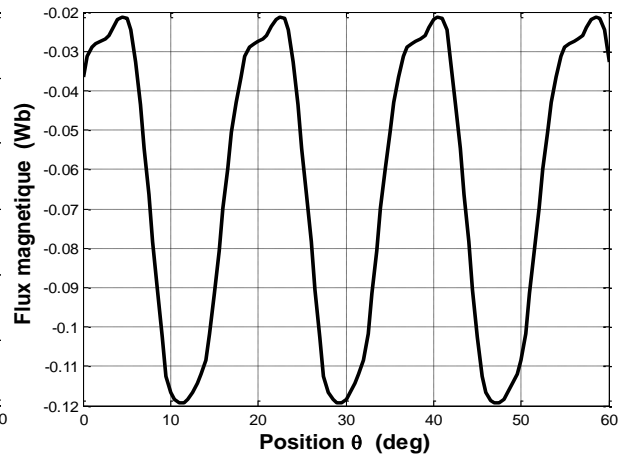
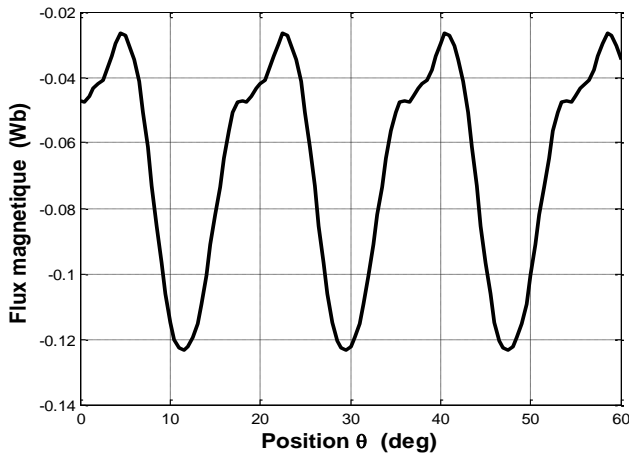


Figure (III.36). Flux magnétique d'une ouverture 15°      Figure (III.37). Flux magnétique d'une ouverture 18°

### III.12. Méthode de Calcul de la force électromotrice

La variation de ce flux par phase en fonction du temps induit une f.c.e.m par phase qui s'exprime par la loi de Faraday, tel que :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{III. 21})$$

Par approximation de la dérivée, l'expression de la f.c.é.m. peut s'écrire :

$$e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta\theta} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (\text{III. 22})$$

Avec:

$\theta$ : Angle de rotation mécanique

$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \Omega$ : Vitesse de rotation mécanique en radian/seconde.

$\frac{\Delta\phi}{\Delta\theta}$ : Variation du flux envoyé par les aimants rotoriques à travers une phase statorique, qui correspond à la f.c.é.m. d'une phase par unité de vitesse.

### III.12.1. Calcul de la force électromotrice

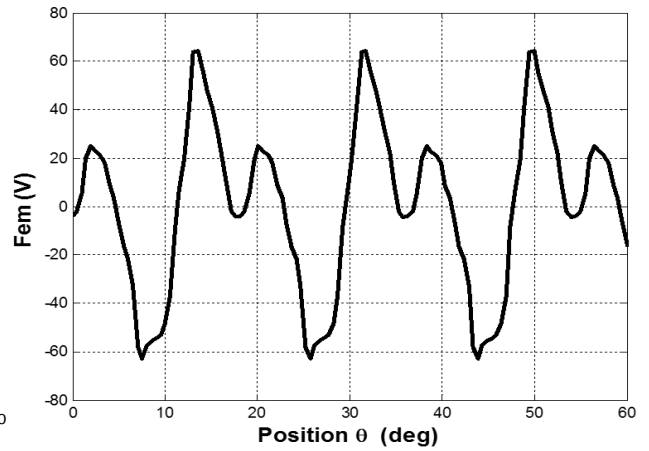
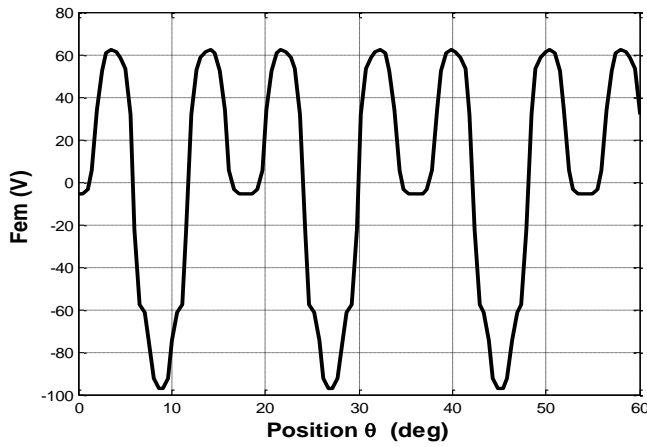


Figure (III.38). Force électromotrice cas une ouverture  $9^\circ$

Figure (III. 39). Force électromotrice cas une ouverture  $12^\circ$

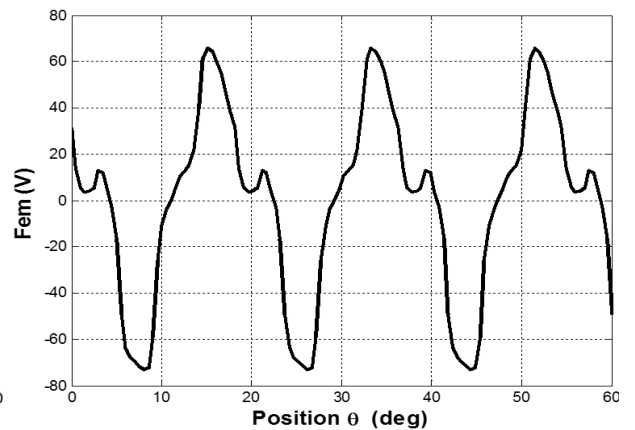
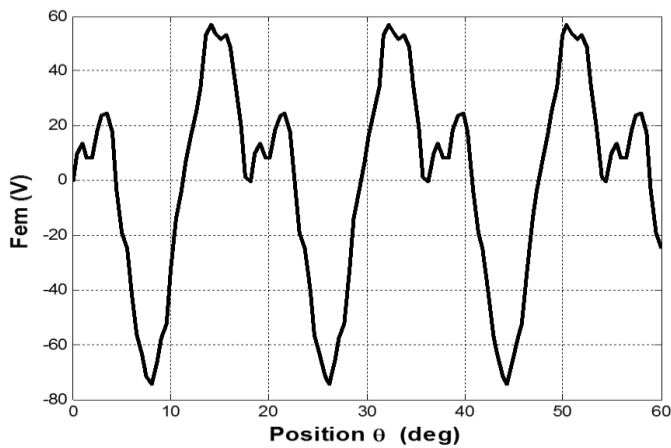


Figure (III.40). Force électromotrice cas une ouverture  $15^\circ$

Figure (III.41). Force électromotrice cas une ouverture  $18^\circ$

Les figure (III.38), (III.39), (III.40), (III.41) représentent la courbe de la force électromotrice en fonction de l'ouverture des encoches du rotor, où la valeur maximale est approximativement égale dans toutes les encoches.

### III.13. Etudes de la machine à l'état de saturation

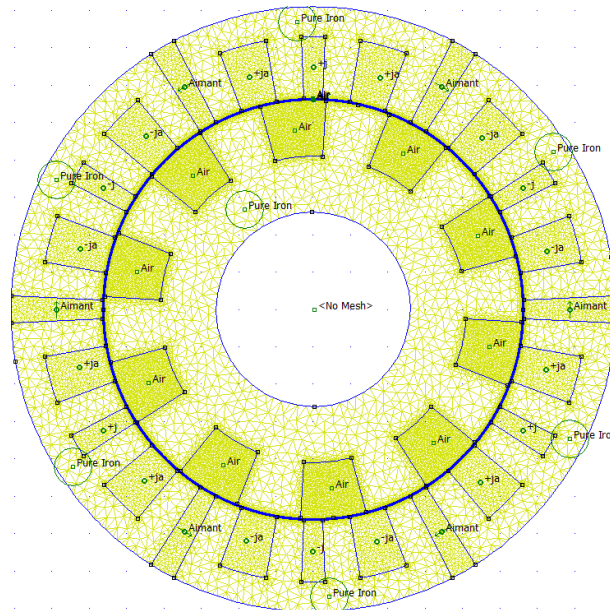


Figure (III. 42). Représentation Du maillage Machine à double excitation

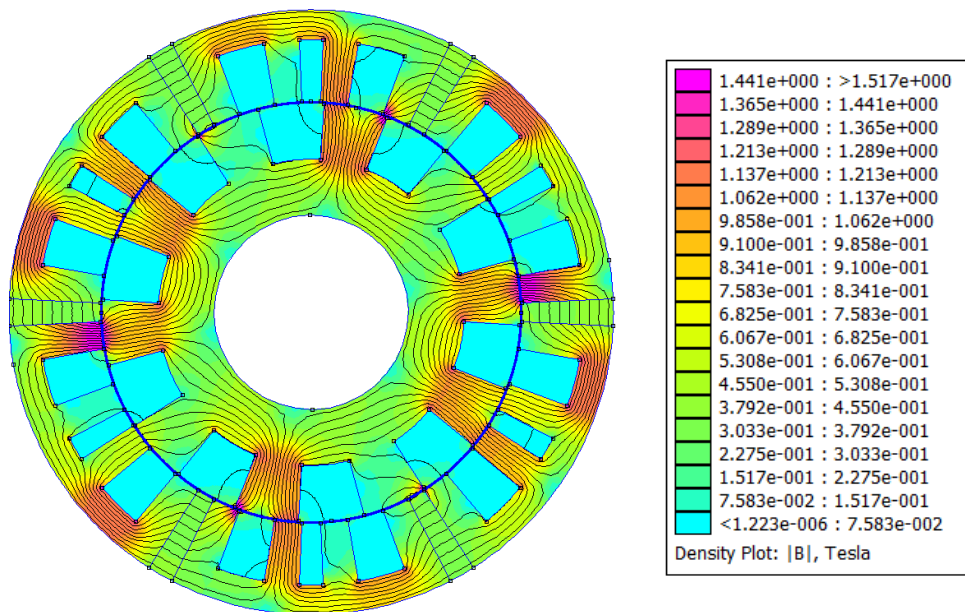


Figure (III.43) : Représentation Du Lignes et distribution du flux magnétique pour MSDE

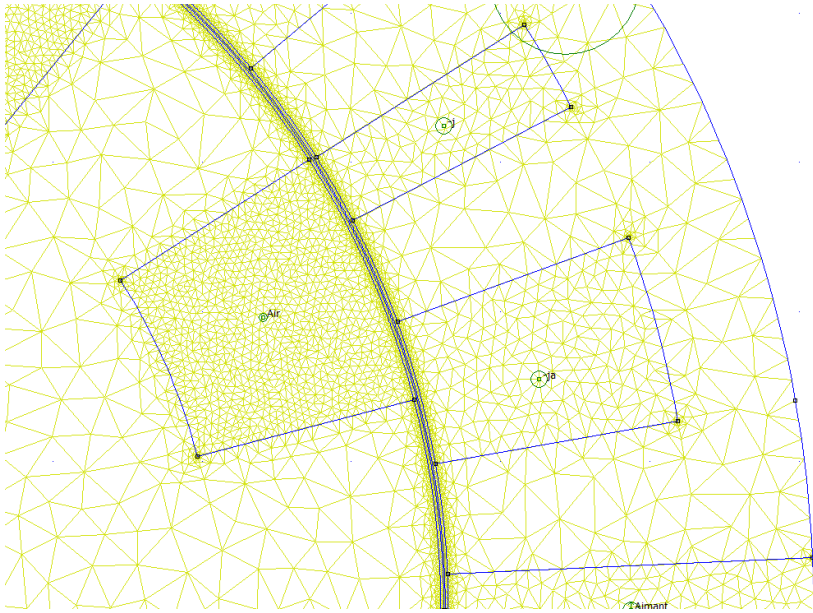
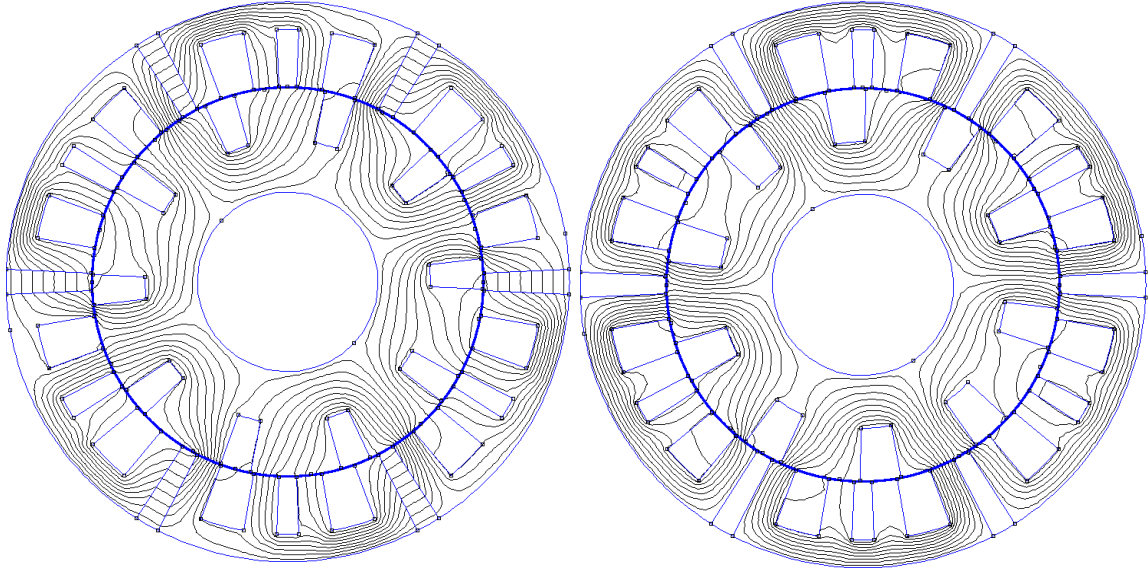


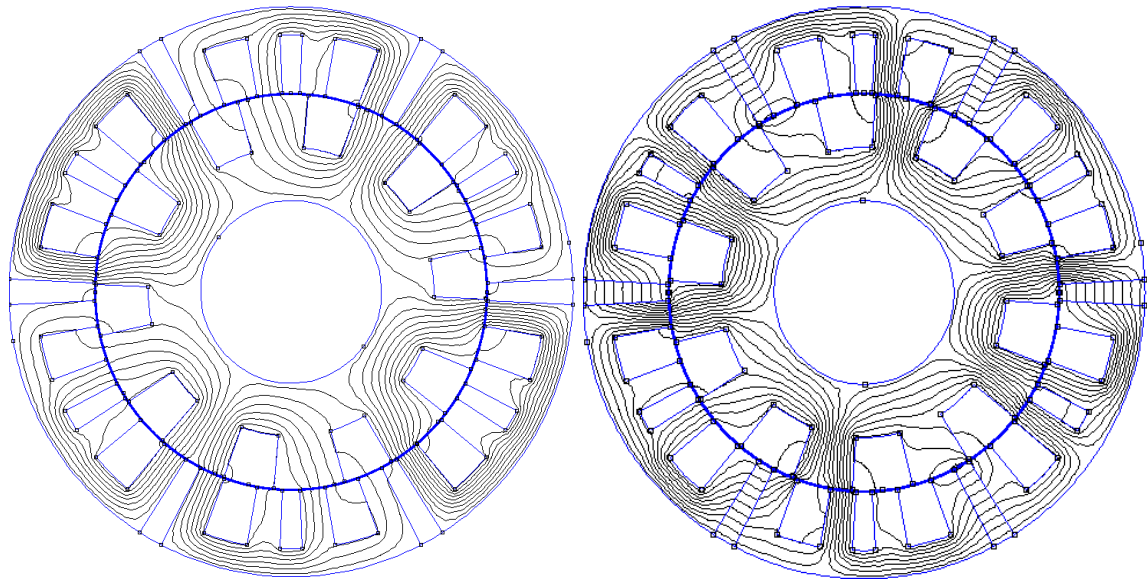
Figure (III.44) : Illustration du maillage de la zone de l'entrefer

**III.14. Cartes de champ magnétique à l'état de saturation**



Ouverture d'encoche rotorique 9°

Ouverture d'encoche rotorique 12°



Ouverture d'encoche rotorique 15°

Ouverture d'encoche rotorique 18°

### III.15. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 9°)

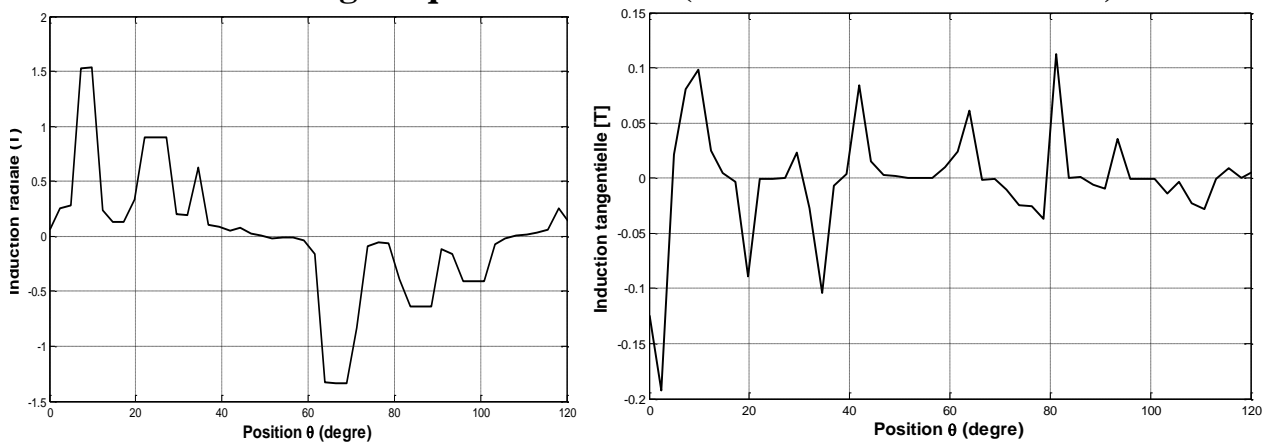


Figure (III. 45). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer cas une ouverture 9°

### III.16. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches $12^\circ$ )

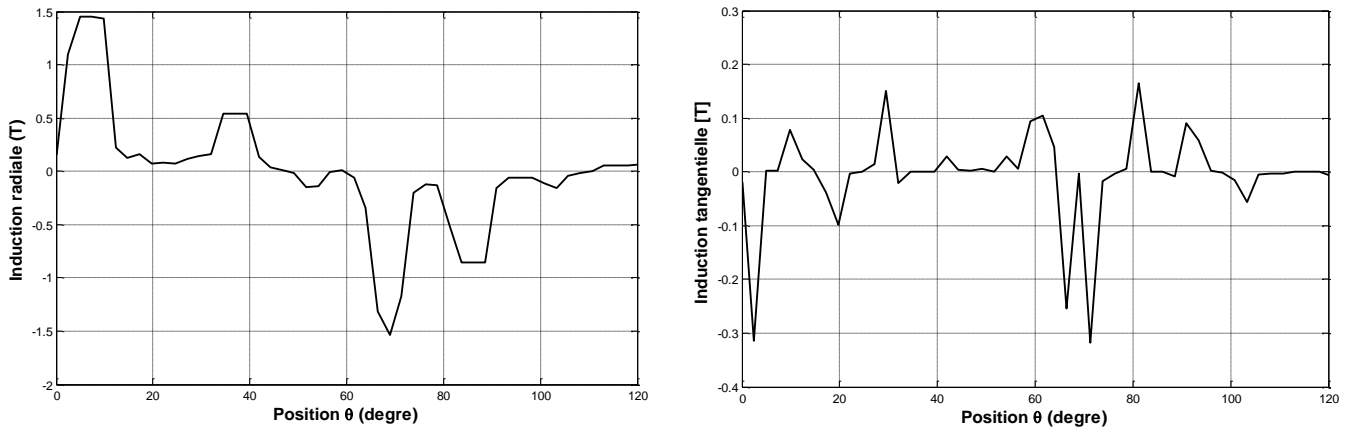


Figure (III.46). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer pour une ouverture  $12^\circ$

### III.17. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches $15^\circ$ )

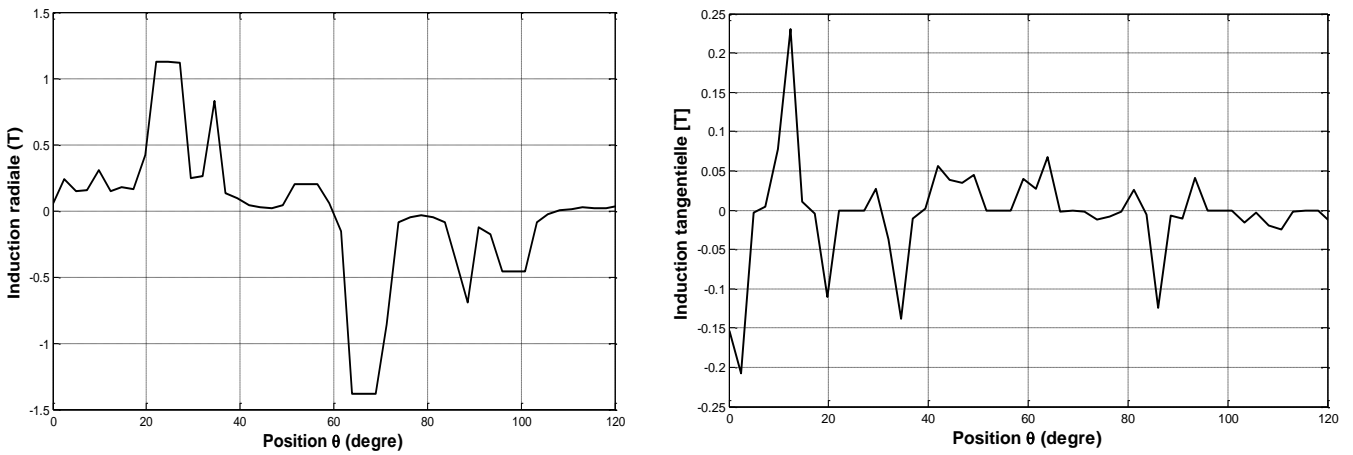


Figure (III.47). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer pour une ouverture  $15^\circ$

### III.18. Inductions magnétiques dans le cas (ouverture des encoches 18°)

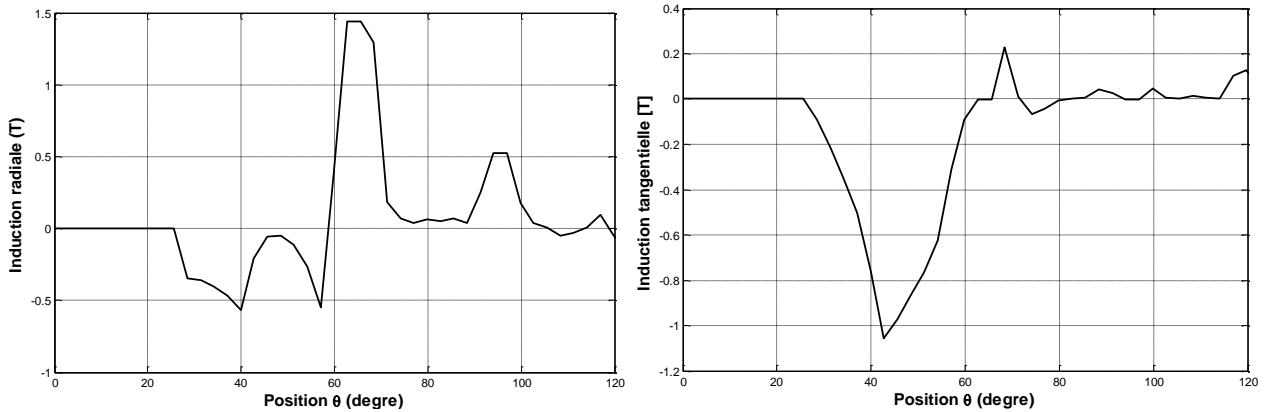


Figure (III.48). Répartition de l'induction tangentielle et radiale dans l'entrefer pour une ouverture 18°

### III.19. Influence des différentes ouvertures des encoches rotoriques sur les différents couples

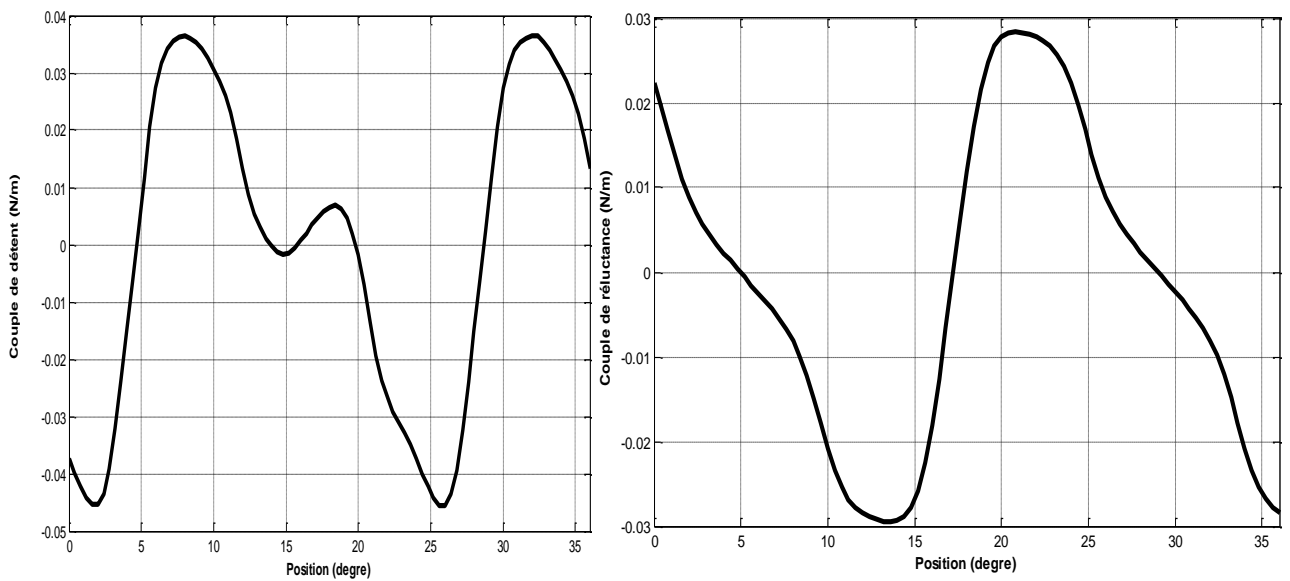


Figure (III.49). Couple de détente et réductant, pour une ouverture 9°

Valeur maximale du couple de détente pour une ouverture 9° égale à : 0.036 (N/m)

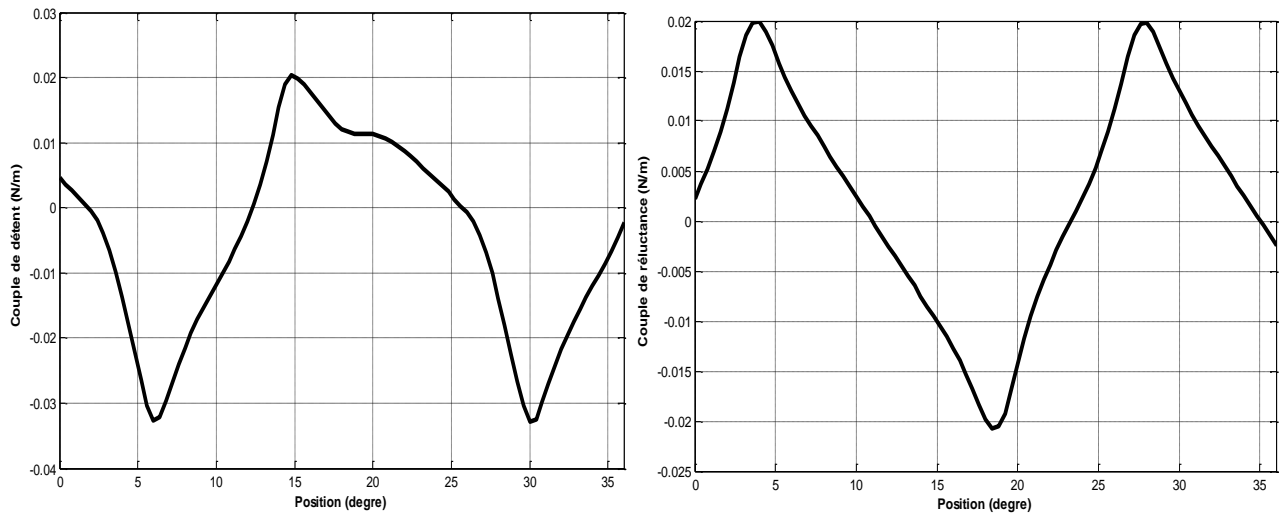


Figure ((III.50). Couple de détente et réluctant, cas d'une ouverture  $12^\circ$

Valeur maximale du couple de détente pour une ouverture  $12^\circ$  égale à : 0.02 (N/m)

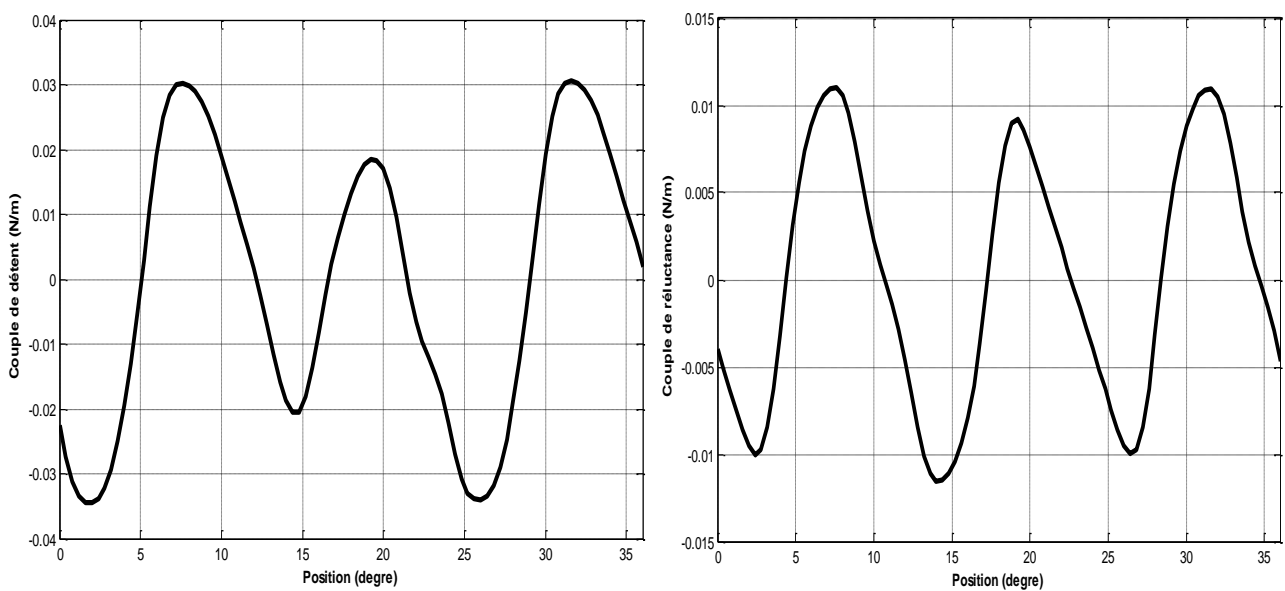


Figure (III. 51): Couple de détente et réluctant, cas d'une ouverture 15

Valeur maximale du couple de détente pour une ouverture  $15^\circ$  égale à : 0.03 (N/m)

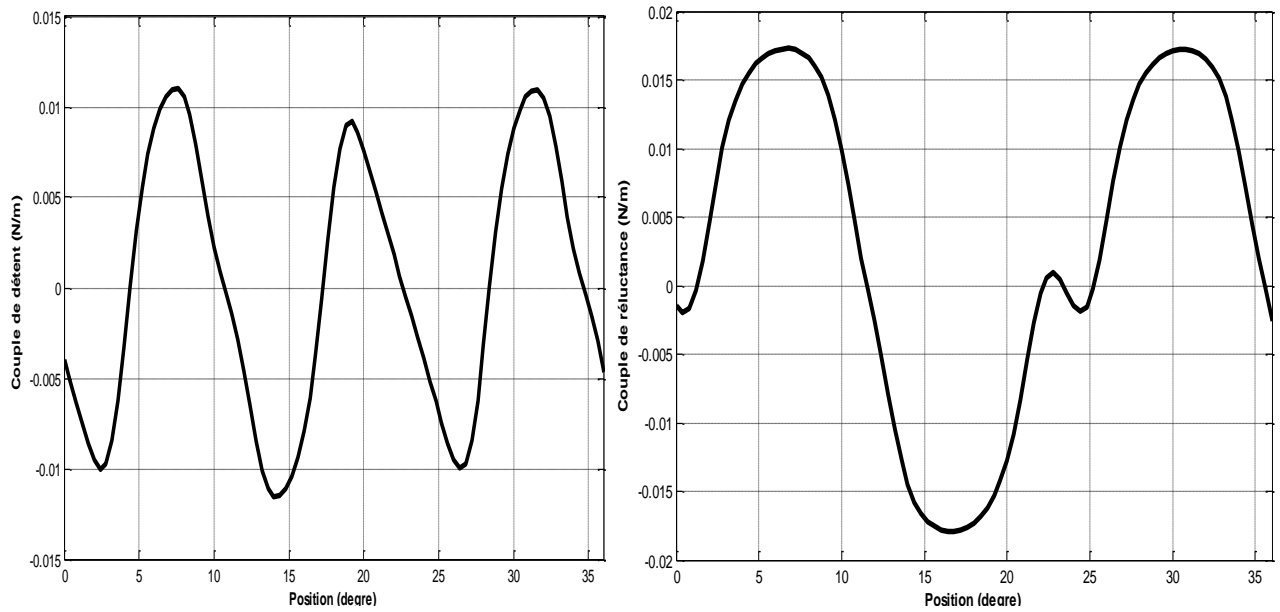


Figure (III.52). Couple de détente et réductant, cas d'une ouverture 18

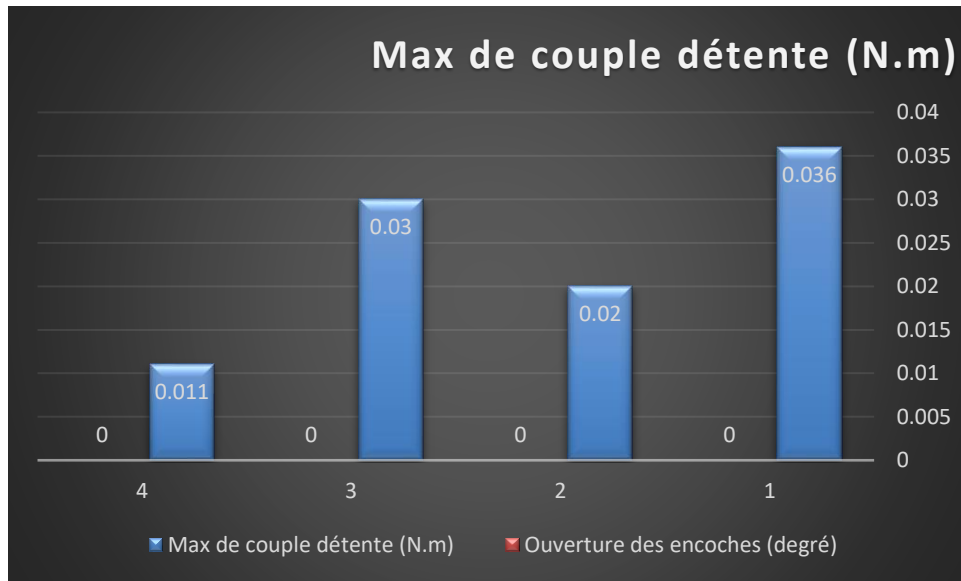
Valeur maximale du couple de détente pour une ouverture 18° égale à : 0.01125 (N/m)

### III.20. Résultats du couple de détente

Ouverture des encoches (degre)	Max de couple détente (N.m)
9°	0.036
12°	0.02
15°	0.03
18°	0.011

Table II: Résultats du couple de détente à l'état de saturation

### III.21. Comparaison du couple de détente



#### Commentaires

Les graphiques représentent les résultats du couple de détente pour les différentes ouvertures des encoches de la machine, où l'on remarque que la valeur du couple change en fonction du changement de la géométrie de l'encoche. La valeur la plus élevée de l'ouverture de la structure est égale à  $9^\circ$  et la valeur la plus basse de l'ouverture de la structure est égale à  $18^\circ$ .

#### Remarque

La présence d'un couple de détente est une préoccupation majeure dans la conception des machines à aimants permanents car il ajoute des harmoniques indésirables au couple moteur, la meilleure structure est donc pour une ouverture d'encoche égale à  $18^\circ$ .

### III.22. Calcul de flux à l'état de saturation

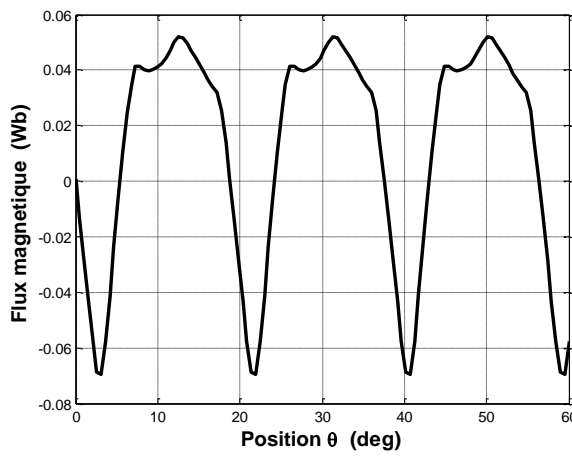


Figure (III.53). Flux magnétique d'une ouverture  $9^\circ$

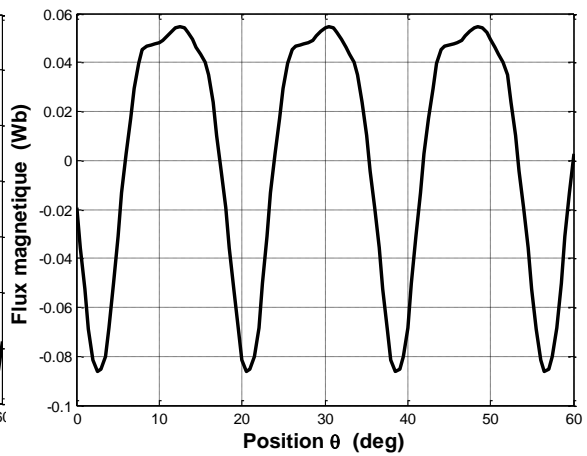


Figure (III. 54). Flux magnétique d'une ouverture

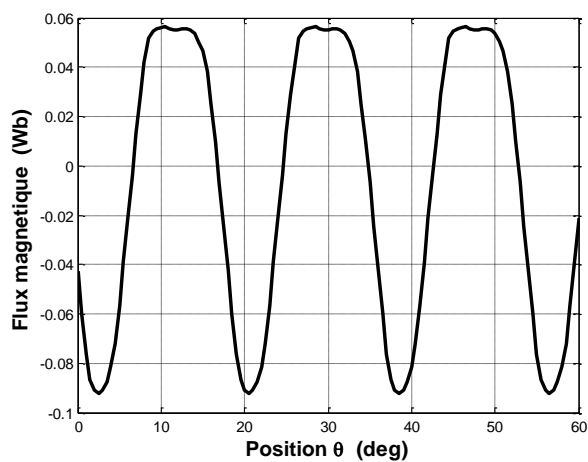


Figure (III. 55). Flux magnétique d'une ouverture  $15^\circ$

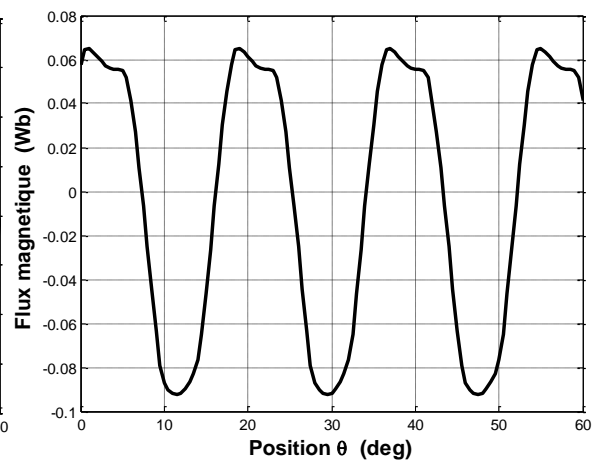


Figure (III.56). Flux magnétique d'une ouverture

### III.23.Calcul des forces électromotrices de chaque ouverture de l'encoche rotorique

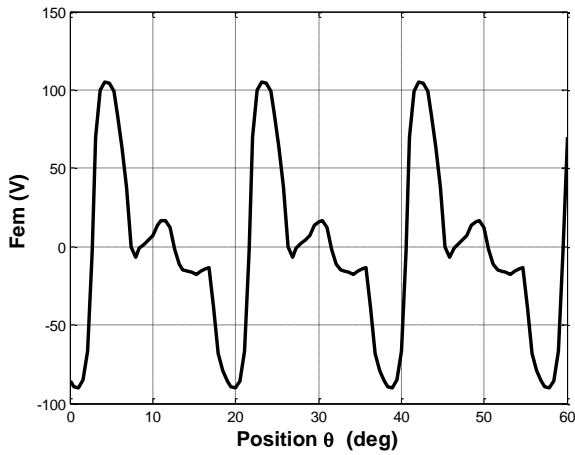


Figure (III.58). force électromotrice cas d'une ouverture  $9^\circ$

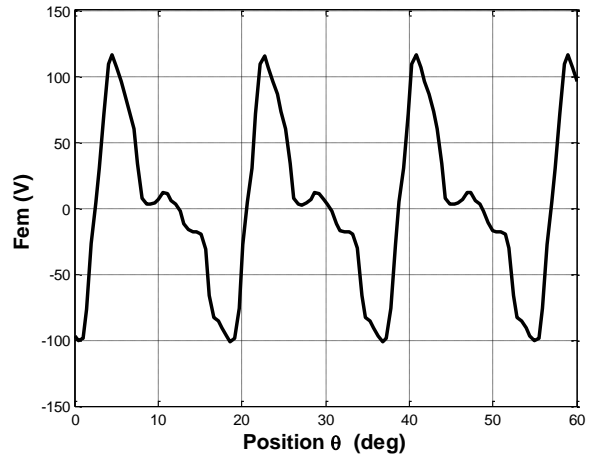


Figure (III.57). force électromotrice cas d'une ouverture  $12^\circ$

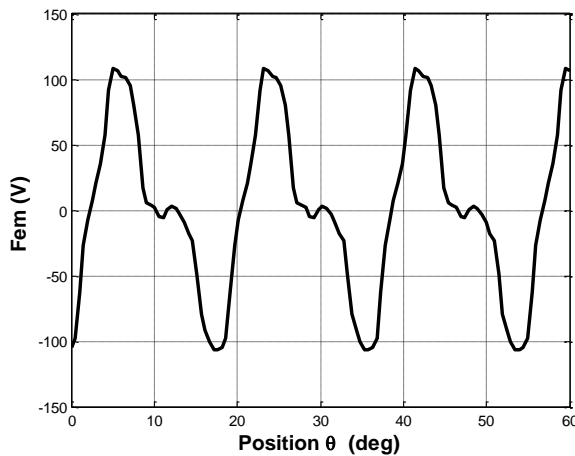


Figure (III. 59). Force électromotrice cas d'une ouverture  $15^\circ$

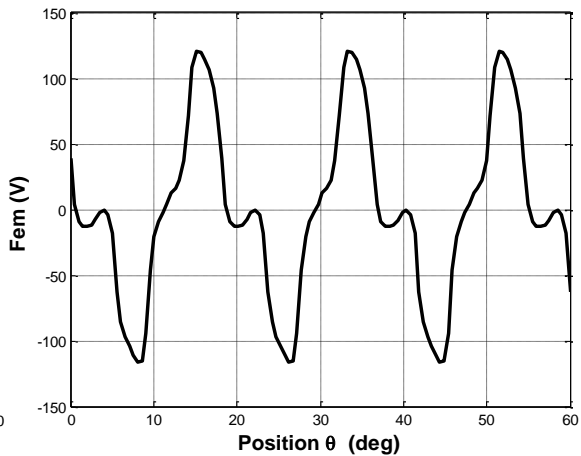


Figure (III. 60). Force électromotrice cas d'une ouverture  $18^\circ$

Les figure (III.57), (III.58), (III.59), (III.60) représentent la courbe de la force électromotrice en fonction de l'ouverture des encoches du rotor, où la valeur maximale est approximativement égale dans toutes les encoches.

### **III.24. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et dimensionné la (MSDE) à l'aide d'un calcul par éléments finis via le logiciel FEMM. Cet outil permet une modélisation plus ou moins acceptable de la machine. Pour les structures dans lesquelles la plupart des phénomènes électromagnétiques se produisent dans l'axe de la machine, une étude bidimensionnelle par éléments finis est plus que suffisante. De nombreux phénomènes physiques peuvent être pris en compte par l'étude des éléments finis bidimensionnels. Le pré-dimensionnement de la structure avec concentration de flux et aimants à double excitation est indispensable. Cette étude nous a permis de déterminer l'effet de certains paramètres électromagnétiques dimensionnels sur les performances de la machine tels que les inductances radiales et tangentielles, les couples de denture, les couples des différentes encoches de l'aimant, et l'ouverture retardée des encoches du rotor.

---

## Conclusion générale

Les facteurs liés à la conception des machines électriques à aimants sont multiples. Il est lié au type d'aimant, à la structure de la machine, le mode d'alimentation et le type de contrôle qui sont indissociables.

Le modèle de conception numérique, basé sur la résolution des équations de champ par la méthode bidimensionnelle des microéléments, compare la structure de la machine avec ses capacités électriques et magnétiques.

Dans le premier chapitre, nous avons un spectacle de présenter les caractéristiques générales des aimants permanents, leurs différents types et les différentes structures (MSAP), puis expliquer les caractéristiques générales de la machine synchrone sans oublier le principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, la méthode des éléments finis et les équations de Maxwell ont été présenté en décrivant le programme de FEMM. Dans notre travail nous nous sommes intéressés aux (MSDE). Ce type de machine présente un niveau de performance global très important par rapport aux autres types de structures des machines existantes.

Dans le dernier chapitre, les équations de champ ou équations de Maxwell sont modélisées numériquement. Les ondulations de couple qui en résultent apparaissent et il est même nécessaire de rechercher des stratégies pour les réduire et les éliminer. Séparément, ces ondulations, liées à structure du rotor et à celle du stator. Elles peuvent être réduites en utilisant des aimants à ouvertures différentes afin d'obtenir un couple parasite de faible ondulations.

---

## Références bibliographiques

- [AMC11] AL.Aouicha, A.Mazouz et A.Cherifi « Modélisation électromagnétique par éléments finis 2D des machines à aimants permanents », mémoire de fin d'études, UMMTO, 2011.
- [BA11] Bouhedda Ali "Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne", Mémoire de Magister de l'université de Mouloud Mammeri, TiziOuzou, 2011.
- [BB06] Chemmouri Boudjema, Gafer Boubekour "Commande non linéaire d'une machine synchrone à aimant permanent", Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila, 2006.
- [KW00] K. Reichert, W. Cai, D. Fulton, « Design of permanents magnet motors with low torque Ripples», In Proc, Conf, ICEM 2000.
- [JG92] J. Gros, « Définition d'un actionneur à aimants permanents et électronique intégrée pour L'automobile » PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1992.
- [AM07] Abada Abdelhalim, Zellagui Mahmoud "Commande adaptative par modèle de référence, application sur la machine synchrone à aimants permanents " Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila, 2007.
- [RL06] R.Lateb, « Modélisation des machines asynchrones et synchrones à aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : application à la propulsion marine par POD», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 2006.
- [WS05] T.Wildil et G.Sybille, « Electrotechnique », 4ème édition de Boeck, 2005.
- [JF08] J.A.Farooq, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de doctorat, UTBM, 2008.
- [GH14] GANA Hicham « Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents à Double Excitation", Mémoire de fin d'études, Université de m'sila 2014.
- [MF14] Mohand Said bouhali et Ferhat Bouzidi " Contribution à l'étude de la commande de la MSAP sans capteur par injection de signal de haute fréquence dimensionnement et choix des filtres utilisés ". Mémoire de fin d'études, Université mouloud mammeri de tizi 2014.
- [LAB09] Ladghem chikouche brahim «Calcul des performances d'une machine synchrone à aimants permanant à entrefer lisse». Mémoire De Magister En Electrotechnique, ENP, Alger 2009.

- 
- [AH20] Abdellaoui Hassina "Amélioration des performances des convertisseurs électromécaniques basés sur la machine synchrone à aimants permanents." thèse de doctorat tizi-ouzou 2020.
- [AB20] Abderrahmane BENMOHAD" Etude électromagnétique d'une machine synchrone pour une conception optimale" mémoire de fin d'études université de m'sila 2020.
- [SOB10] Soltane Belakehal « Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » Thèse de doctorat de l'université de Constantine, 2010.
- [AHF10] Aoufi Saliha, Hamdipacha Fatima « Commande par logique floue de la machine synchrone à aimants permanents » Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila, 2010.
- [REA] « Moteur électrique » [online] visit <http://www.moteurindustrie.com/> )
- [CDA11] CHAIBET Soufiane et DAHMANE Arezki et DERRADJ Radia" Contribution à l'étude thermique d'un moteur synchrone à aimant permanent" Mémoire de Master de l'université de Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2011.
- [BN15] BENTOUMI Nesrine "Détermination des paramètres d'une machine à griffe application au domaine automobile" Mémoire de fin d'études université de m'sila 2015.
- [OUB10] M.Oubidar, S.Bendaoud. Machine Synchrone/Asynchrone, Projet de fin d'étude en ingénierie, Université du québec en Abitibi-Témiscamingue, 2010.
- [MAH12] M.S.Mahgoun. Application De La Commande Aux Systèmes Linéaires Perturbés, Mémoire de Magister, Université ferhat abbas-Setif (UFAS), 2012.
- [AID13] H.Aid, W.Aina. Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entraînement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents, Mémoire de Master, Université abou bekr belkaid, Tlemcen, 2013.
- [DR07] D. RAHEM, "Contribution à l'étude du champ magnétique dans des pièces ferromagnétiques en utilisant des méthodes numériques : application à l'analyse des performances des machines a aimants permanents et a reluctance variable ", thèse de doctorat de l'université de Batna, le 24 décembre 2007.
- [ABH09] Abdellaoui Nassima, « Etude expérimental de la position rotorique d'un MSAP par variable électrique 2009 ».

---

[MA12] Mohamed Alaa Eddin Alali, « Commande non linéaire d'une machine synchrone à aimants permanents avec observation en utilisant le filtre de kalman étendu », Mémoire de Master de l'université de M'sila, 2012.

[BB12] BOUKAIS Boussad, « contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012.

[RS08] R.Saou, "Modélisation et optimisation de machines lentes à aimants permanents : Machines à double saillance et à inversion de flux", Thèse de doctorat d'état, ENP d'Alger, 2008.

[FM12] F. MEZAËCHE Farouk, « Analyse des performances électromagnétiques de machines à aimants montés sur la surface du rotor », mémoire de magistère, janvier 2012.

[AA05] A. Aissa « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent dotée d'un Observateur d'ordre Complet à Mode Glissants » Thèse de Magister, Université de Batna 2005.

[FGR95] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausier, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance » Volume4 : La conversion continue Alternatif, Lavoisier, 1995.

[ER99] E Peschke and R Von Olshausen. Cable systems for high and extra-high voltage. Publicis MCD Werbeagentur GmbH, 1999.

[MR86] M.Récan. « Application de la méthode des éléments finis à la simulation des transferts dans les eaux souterraines », bureau de recherches géologiques et minières, département eau, octobre 1986.

[BT16] BENTRIOU Cherifa. « Simulation numérique d'un isolateur de haute tension a fréquence industrielle 50 Hz », mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme master en génie électrique, Université Mohamed Boudiaf Msila, 2015/2016.

[OHUM] Ourdia HAMADOUCHE. « Modélisation numérique du transport de charges dans les diélectriques soumis à un champ électrique extérieur », Mémoire, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Département de physique.

[YA16] Yahia Abdelhamid KERDACHE. « Etude de l'influence du maillage sur la simulation de la fatigue mécanique de l'acier 304L », Mémoire de Master, Département de Métallurgie, le 29 Juin 2016.

---

**[MSF08]** S. TOUNSI et F. CHIKH, « Influence Du Sol Sur Le Comportement D'un Modèle d'Isolateur Sous Tension », Mémoire Du Projet De Fin D'études Pour L'obtention Du Diplôme d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Département De Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2008.

**[MO10]** M. OUCHEN Lyamine. « Modélisation Et Simulation Des Isolateurs Par La Méthode Des Eléments Finis », université FERHAT ABBAS-SETIF, Département d'Electrotechnique, le 14/12 /2010.

**[MOMR11]** M.O. MEFTAH et M. RAHAL. «Performances d'Isolateurs HT Pollués sous Tension Alternative 50Hz et Distributions du Champ et du Potentiel Electriques utilisant COMSOL », école nationale polytechnique, département d'électrotechnique, Mémoire du Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, juin 2011.

**[RF16]** REBAHI Fares. « Etude de l'Influence des Paramètres Géométriques et de Contrôle sur les Performances des MRV Cylindriques », Université des Frères MENTOURI CONSTANTINE, Département d'Electrotechnique, 09 / 06 / 2016.

**[SH08]** Sami HLIOUI«Étude d'une Machine Synchrone à Double Excitation» Thèse de Doctorat l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l'université de Besançon 2008.

**[LH94]** L.Hajout, « Analyse des performances électromagnétiques d'une machine synchrone autopilotée à aimants à rotor lisse » Mémoire de magister, ENP Alger, 1994.

**[SFEMM]** <http://www.femm.info/wiki/home> page

## Résumé :

Le sujet de ce mémoire porte sur un type très important de machines appliqué aux domaines de l'industrie comme, la robotique, et la mécanique de précision. La machine proposée est une machine synchrone à aimants permanents à double excitation. Pour étudier cette machine synchrone, on utilise une méthode numérique basée sur les éléments finis, cette technique qui est nécessaire permet de calculer les performances de cette machine comme la force électromotrice réelle, le couple électromagnétique, le couple de détente, le couple de réluctance ainsi que le couple total. La structure de la machine synchrone à aimants permanents à double excitation est modélisée dans des conditions de calcul thermiques et mécanique fixes.

## ملخص

يتعلق موضوع هذه الأطروحة بنوع مهم جداً من الآلات المطبقة في المجالات الصناعية مثل الروبوتات والميكانيكا الدقيقة. الآلة المقترحة عبارة عن آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم مزدوج الإثارة. لدراسة هذه الآلة المتزامنة، نستخدم طريقة عددية تعتمد على عناصر محدودة، هذه التقنية الضرورية تجعل من الممكن حساب أداء هذه الآلة مثل القوة الدافعة الكهربائية الحقيقية، عزم الدوران الكهرومغناطيسي، عزم التمدد، عزم الممانعة كما وكذلك من إجمالي عزم الدوران. تم تصميم هيكل الآلة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم المزدوج تحت ظروف حسابية حرارية وميكانيكية ثابتة.

## ABSTRACT

The subject of this manuscript concerns a very important type of machine applied to industrial fields such as robotics and precision mechanics. The proposed machine is a double-excited permanent magnet synchronous machine. To study this synchronous machine, we use a numerical method based on finite elements, this technique which is necessary makes it possible to calculate the machine performances such as the real electromotive force, the electromagnetic torque, the cogging torque, the reluctance torque as well as than the total torque. The structure of the double-excited permanent magnet synchronous machine is modeled under fixed thermal and mechanical calculation conditions.