

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Critère de fonctionnement de la
machine PDD**

Présenté par :
Midoun Tayeb
Soutenu le : 01 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mme Boumaraf Rabia

Mr Mimoune Sourî Mohamed

Mme Becha Habiba

Grade: MAA

Grade: Pr

Grade: MAA

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Critère de fonctionnement de la machine PDD

Présenté par :
Midoun Tayeb

Avis favorable de l'encadreur :
Mimoune Sourî Mohamed

Avis favorable du Président du Jury
Mme Boumaraf Rabia

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Thème :

Critère de fonctionnement de la machine PDD

Proposé par : **Midoun Tayeb**

Dirigé par : **Mimoune Soury Mohamed**

RESUMES (Français et Arabe)

Dans ce travail, on a expliquée le principe de fonctionnement de la machine Pseudo Direct drive qui basée a l'engrenage magnétique. Ainsi ces composants et leur applications puis les avantage par rapport les machines conventionnels.

من خلال هذا العمل قمنا بشرح مبدأ عمل الآلة الكهربائية المسماة Pseudo Direct drive التي تعتمد على التروس المغناطيسية, أيضا مكوناتها و استعمالاتها و ايجابياتها بالمقارنة بالآلات التقليدية.

Dedicaçe

A ma Grande Louiza

A mon père **Midoun Ziane**

A mes frères et mes sœurs

A ma fiancée **Kahoul Amira Fella**

A mon encadreur **Pr. Mimoune**

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter.

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

Avec toute ma tendresse.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.

Affectueuse reconnaissance

A mon ami intime **Kimou Mimou**

A mes porches **Zinou, Islam, Nani,**

A tous mes amis

A mes camarades d'auditoires et tous ceux de la faculté des sciences de

l'Université de Med khider Biskra.

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Je tiens à remercier sincèrement **Pr. Mimoune**, qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et qui était très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration.

Mes remerciements s'adressent également à ma fiancée **Kahoul Amira Fella**: qui m'a aidé beaucoup et pour sa grande patience dont il a su faire preuve malgré ses charges académiques.

Je n'oublie pas mes amis pour leur contribution, leur soutien.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et mes collègues, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

- Figure I.1** Illustration d'une courbe B-H des aimants.
Figure I.2 Courbe de désaimantation.
Figure I.3 Le moteur industriel à aimants permanents.
Figure I.4 Moteur à rotor intérieur.
Figure I.5 Structures à aimants déposés en surface.
Figure I.6 Structure à aimants encastrés.
Figure I.7 Structure à aimants enterrés.
Figure I.7.(a) avec concentration de flux.
Figure I.7.(b) structure classique.
Figure I.8 Moteur à rotor extérieur.
Figure I.9 Les application principales des MSAP.

Chapitre II

- Figure II.1** Le train magnétique.
Figure II.2 Modèles de réducteurs magnétiques.
Figure II.3 Schéma du train planétaire magnétique.
Figure II.4 Réducteur magnétique et mécanique.
Figure II.5 Coupe axiale de la machine PDD.
Figure II.6 Coupe radiale de la machine PDD.
Figure II.7 Schéma du la machine PDD.
Figure II.8 Plusieurs formes de Néodyme-Fer-Bore.

Chapitre III

- Figure III.1** Triangulation of Massachusetts.
Figure III.2 les boutons Dessin dans la barre d'outils.
Figure III.3 les boutons de la barre d'outils de manipulation.
Figure III.4 les boutons grille de la barre d'outils de manipulation.
Figure III.5 Dialogue de Définition du problème.
Figure III.6 boîte de dialogue de définition de propriété
Figure III.7 boîte de dialogue Propriété des limites.
Figure III.8 boîte de dialogue propriété de bloc.
Figure III.9 Boîte de dialogue Matériels bibliothèque.

Figure III.10 Circuit de dialogue Propriété.

Figure III.11 boutons de la barre d'outils pour le démarrage des tâches d'analyse.

Chapitre IV

- Figure. IV.1** Dispositif étudié.
- Figure. IV.2** Dispositif étudié en détail.
- Figure. IV.3** Dispositif étudié de la 1^{ère} étape.
- Figure. IV.4** Géométrie modélisée de la 1^{ère} étape
- Figure. IV.5** le maillage en la position initiale
- Figure. IV.6** les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale
- Figure. IV.7** le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de la position.
- Figure. IV.8** Induction magnétique : position $\theta = 45^\circ$ et couple maximum négatif.
- Figure. IV.9** Induction magnétique : position $\theta = 90^\circ$ et couple nul.
- Figure. IV.10** Induction magnétique : position $\theta = 135^\circ$ et couple maximum positif.
- Figure. IV.11** Induction magnétique : position $\theta = 180^\circ$ et couple nul.
- Figure. IV.12** Le dispositif étudié dans la 2^{ème} étape
- Figure. IV.13** la géométrie de la 2^{ème} étape.
- Figure. IV.14** le maillage du dispositif étudié
- Figure. IV.15** montre les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale.
- Figure. IV.16** le couple appliqué sur le rotor externe en fonction de la position.
- Figure. IV.17** le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de la position.
- Figure. IV.18** la comparaison entre les deux couples (interne et externe).
- Figure. IV.18. (a)** la comparaison entre les deux couples (interne et externe).
- Figure. IV.18. (b)** la comparaison entre les deux couples (interne et externe).
- Figure. IV.19** la différence entre les deux couples interne et externe.
- Figure. IV.20** Le dispositif étudié de la 3^{ème} étape (La machine PDD complète)
- Figure. IV.21** la géométrie de la 3^{ème} étape.
- Figure. IV.22** le maillage du dispositif étudié
- Figure. IV.23** les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale
- Figure. IV.24** le couple appliqué sur le rotor externe en fonction de la position.
- Figure. IV.25** le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de la position.
- Figure. IV.26** la comparaison entre les deux couples (interne et externe)
- Figure. IV.27** Induction magnétique : position $\theta = 0^\circ$ et couple maximum positif.

Figure. IV.28 Induction magnétique : position $\theta = 4.45^\circ$ et couple maximum négatif.

Figure. IV.29 Induction magnétique : position $\theta = 8^\circ$ et couple maximum négatif.

Figure. IV.30 Induction magnétique : position $\theta = 12^\circ$ et couple maximum négatif.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau. I.1** Classification des aimants permanents
- Tableau. I.2** Tableau récapitulatif des caractéristiques des aimants
- Tableau II.1** Dimensionnement de la machine Pseudo Direct Drive

TABLE DES SYMBOLES

R_{int}	Rayon du rotor interne
H_{as}	Largeur des aimants statoriques
L_{as}	Longueur des aimants statoriques
H_{ar}	Largeur des aimants du rotor interne
H_{ext}	Largeur de rotor externe
L_{pf}	Rayon des pièces ferromagnétiques du rotor externe
L_s	Largeur du circuit magnétique de stator
E_{int}	Entrefer entre rotor interne et rotor externe
E_{ext}	Entrefer entre rotor externe et stator
L_{dnt}	Largeur des dents statorique
H	le champ magnétique.
B	l'induction magnétique.
μ_r	la perméabilité de recul relative
μ	La perméabilité magnétique
J	la densité de courant.
μ	La Perméabilité magnétique.
μ_0	La perméabilité de l'air.
A	le potentiel vecteur
∇	nabla
M	une matrice carrée,
b	un vecteur
x	un vecteur d'inconnues à déterminer

Résumés

Dans ce travail, on a expliquée le principe de fonctionnement de la machine Pseudo Direct drive qui basée a l'engrenage magnétique. Ainsi ces composants et leur applications puis les avantage par rapport les machines conventionnels.

ملخص :

من خلال هذا العمل قمنا بشرح مبدأ عمل الآلة الكهربائية المسماة Pseudo Direct drive التي تعتمد على التروس المغناطيسية, أيضا مكوناتها و استعمالاتها و ايجابياتها بالمقارنة بالآلات التقليدية

Sommaire

Introduction Générale	1
 Chapitre I : Généralités Sur Les machines synchrone à aimants permanent	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les Aimants Permanents.....	4
I.2.1. Les Différents Types D'aimants Permanents	4
I.3. Constitution de La Machine Synchrone A Aimants Permanents	6
I.4. Principe de Fonctionnement.....	6
I.5. Les Aimants Permanents Utilisés pour Machine Synchrone a Aimants Permanents....	7
I.6. Différents Types De Machines à Aimants Permanents.....	8
I.6.1. Moteur à rotor intérieur.....	8
I.6.1. (a). Structures à aimants déposés en surface.....	8
I.6.1. (a).1. Structures à aimants encastrés.....	9
I.6.1. (a).2. Structures à aimants enterrés.....	10
I.6.2. Moteur à rotor extérieur.....	10
I.7. Les avantages et les inconvénients.....	11
I.8. Les applications des MSAP.....	11
I.8. Conclusion.....	12
 Chapitre II : La Machine Pseudo Direct Drive	
II.1. Introduction.....	13
II.2. Généralité Sur L'engrenage Magnétique.....	13
II.2.1. Roue D'engrenage Magnétique.....	16
II.2.2. Principe De Fonctionnement.....	16

II.2.3. Les Avantages Par Rapport Au Réducteur Mécanique.....	17
II.3. La Conception De La Machine PDD.....	17
II.3.1. Structure De La Machine PDD.....	17
II.3.2. Dimensionnement de la machine Pseudo Direct Drive.....	19
II.3.3. Principe De Fonctionnement.....	19
II.4. Les Avantages De La Machine PDD.....	20
II.5.Applications.....	21
II.6.Conclusion.....	22

Chapitre III : Le Logiciel Finite Element Method Magnetics

III.1.Introduction.....	23
III.2.Généralité	24
III.3. Les Problèmes Magnétostatiques.....	24
III.4. Analyse Par Éléments Finis.....	25
III.5. Magnétiques Préprocesseur.....	26
III.5.1. Preprocessor Drawing Modes \ Préprocesseur Dessin modes.....	26
III.5.2. Keyboard and Mouse Commands \ Clavier et souris commandes.....	27
III.5.3. View Manipulation \ Voir Manipulation.....	27
III.5.4. Grid Manipulation \ Grille Manipulation	27
III.5.5. Edit \ Modifier	28
III.5.6. Definition of Properties \ Définition du problème.....	28
III.5.7. Definition of Properties \ Définition des Propriétés	30
III.5.8. Boundary Properties \ Propriétés des limites.....	30
III.5.9. Materials Properties \ Les propriétés des matériaux.....	31
III.5.10. Materials Library \ Matériels bibliothèque.....	32

III.5.11. Circuit Properties \ Propriétés de circuits.....	33
III.5.12. Analysis Tasks \ Tâches d'analyse.....	34
III.6. Les méthodes numériques.....	35
III.7. Conclusion.....	36
Chapitre IV : Interprétations Des Résultats	
Introduction.....	37
1 ^{er} étape : Etude la machine PDD sans rotor externe et les aimants statoriques.....	39
a) Position $\theta = 45^\circ$: couple est maximum négatif.....	41
b) Position $\theta = 90^\circ$: couple est nul.....	41
c) Position $\theta = 135^\circ$: couple est maximum positif.....	42
d) Position $\theta = 180^\circ$: couple est devenue nul.....	43
2 ^{eme} étape : étude la machine PDD sans les aimants statorique (étude le rotor interne avec le rotor externe).....	44
3 ^{eme} étape : étude de la machine PDD complète.....	49
a) Position $\theta = 0^\circ$: couple est maximum positif.....	52
b) Position $\theta = 4.45^\circ$: couple est nul.....	52
c) Position $\theta = 8^\circ$: couple est maximum négatif.....	53
d) Position $\theta = 12^\circ$: couple est devenue nul.....	54
Conclusion	54
Conclusion général	55
Bibliographie.....	56

Introduction générale

L'augmentation croissante de l'utilisation des machines électriques dans diverses applications a 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.

À couple élevé, les trains d'entraînement à basse vitesse incorporent habituellement un engrenage mécanique pour augmenter ou réduire la vitesse à l'entrée ou la sortie d'une machine. Ces systèmes d'engrenages fournissent un profil de vitesse et de couple de sorte que la machine n'a pas besoin d'être trop grande et les coûts du système sont réduits au minimum. Cependant, alors que les systèmes réducteurs offrent une flexibilité, elles introduisent également le besoin de lubrification et d'entretien, de réduire l'efficacité de charge partielle, et sont un point de défaillance potentiel.

En 2001, le groupe de machines électriques et entraînements à l'université de Sheffield a inventé un contact, le système de transmission sans lubrifiant alternatif capable de délivrer des niveaux préindustriels de couple et de puissance. Ses engrenages magnétiques à couple élevé peut atteindre des densités de couple comparables à engrenages mécaniques, mais ils n'ont aucun élément de maillage de sorte qu'ils sont silencieux (et sont donc adaptés pour les applications où un fonctionnement furtif est nécessaire). Les vitesses peuvent atteindre des rendements de plus de 99 % à pleine charge, ils n'ont pas besoin d'être lubrifié, et nécessitent peu ou pas d'entretien. Le système de transmission est une machine qui peut éliminer le besoin d'une boîte de vitesses mécanique dans de nombreuses applications de la chaîne cinématique, c'est une nouvelle technologie s'appelle la Pseudo direct drive ou la PDD

Généralement l'étude des machine électriques est nécessite plusieurs de temps et un matériel très cher, alors le plus part des ingénieurs utilisent les logiciels professionnels comme FLUX 2D, MAXWELL, FEMM pour étude les machines électriques et trouve les solutions de ces problèmes car l'accessibilité et la facilite d'utilisation.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les différentes configurations des machines synchrones à aimants permanents en rapportant les différents types d'aimants permanents en rapportant les différents types d'aimants permanents ainsi que les diverses topologies du rotor.

Le deuxième chapitre, nous donnons la conception de la machine Pseudo Direct Drive (PDD) et quelques applications, et enfin les avantages de cette machine.

Le troisième chapitre, on va expliquer le logiciel Finite Element Method Magnetics dans une manière plus détaillée.

Le quatrième chapitre, nous utilisons le logiciel Finite Element Method Magnetics pour expliquer le principe de fonctionnement de la machine pseudo direct drive.

Chapitre I

I.1. INTRODUCTION

Qu'elles soient en mode moteur ou générateur, les machines synchrones à aimants permanents sont devenues plus attractives car elles répondent bien aux exigences des nouvelles technologies. Le regain d'intérêt, pour ces machines, est dû en grande partie à leurs excellentes caractéristiques dynamiques, à leurs faibles pertes ainsi qu'à leur important couple massique, qui les rendent mieux adaptées aux applications industrielles à entraînements électriques nécessitant des commandes en position ou en vitesse.

L'essor considérable de ces machines a été possible grâce aux avancées technologiques dans le domaine des aimants permanents. En effet, l'avènement des aimants à terres rares de type Sm-Co et Nd-Fe-B a permis, non seulement d'augmenter la densité d'énergie de ces machines, mais aussi de réduire leurs dimensions et leurs pertes. De plus, l'excitation à aimants permanents a permis à ces machines de fonctionner sans collecteur et sans balais (Brushless) et, d'augmenter ainsi leur durée de vie tout en réduisant le coût de leur maintenance.

Dans ce premier chapitre, nous présentons les différents types d'aimants permanents ainsi que les principales structures des machines synchrones à aimants permanents et leur domaine d'application.

I.2. LES AIMANTS PERMANENTS

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis (figure I.1) et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur. La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

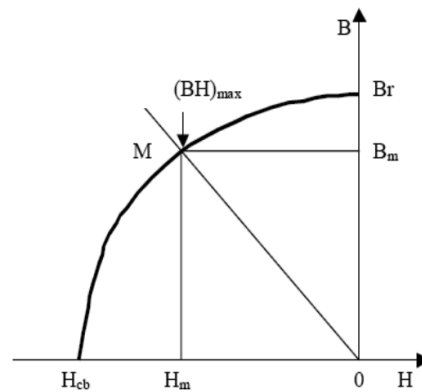


Figure I.1 : Illustration d'une courbe B-H des aimants

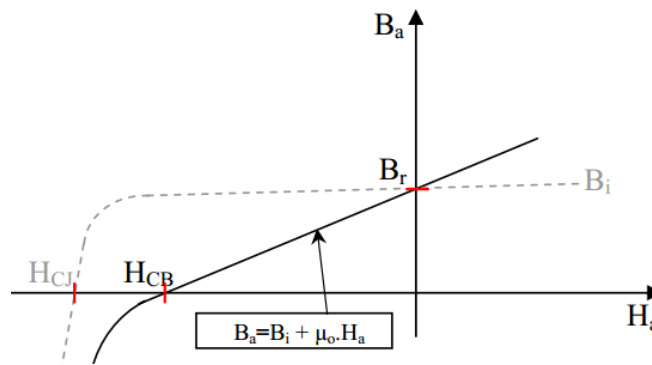


Figure I.2. courbe de désaimantation

I.2.1. LES DIFFERENTS TYPES D'AIMANTS PERMANENTS

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

- **Les Alnico:** aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel Cobalt.

Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de

caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de part leur composition métallique ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.

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

- **Les alliages métaux – terres rares:** ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé.

Le choix d'aimant est effectué en fonction des caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans le tableau I.1 ci-dessous.

Type d'aimants	Densité d'énergie	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif Hc (kA/m)	Temperature T _{max} (°C)	Prix (€ / Kg)
NdFeB	200-380	1,2-1,5	900-2000	140 -220	80-150
Sm Co5	140-200	1	2000	280	220
Sm ₂ Co ₁₇	180–240	1,05	2000	350-550	300
Alnico	50–85	1,1-1,3	130	550	45
Ferrites strontium	27–35	0,3-0,4	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0,2-0,4	170	100-240	4,5

Tab. I.1 Classification des aimants permanents

I.3. CONSTITUTION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS

Le moteur synchrone est constitué de deux parties :

1) Partie fixe (Le stator):

Représente la partie fixe de la machine (Fig.I.2), destiné à produire le champ tournant, comporte le circuit magnétique ferromagnétique constitué d'un empilage de tôles en acier au silicium ou bien d'alliage fer-silicium de 0.35 à 0.5 mm, qui accueille dans ces encoches les enroulements statorique triphasé bobiné en fil de cuivre isolé. Les bobines sont décalées de 120° dans l'espace et connectées en triangle ou en étoile [1].

2) Partie mobile (Le rotor):

Représente la partie mobile de la machine formée d'un assemblage de tôles et d'aimants sous la forme cylindrique créant le flux inducteur et de l'arbre de sortie (une ou deux extrémités) fournit la puissance mécanique [3].

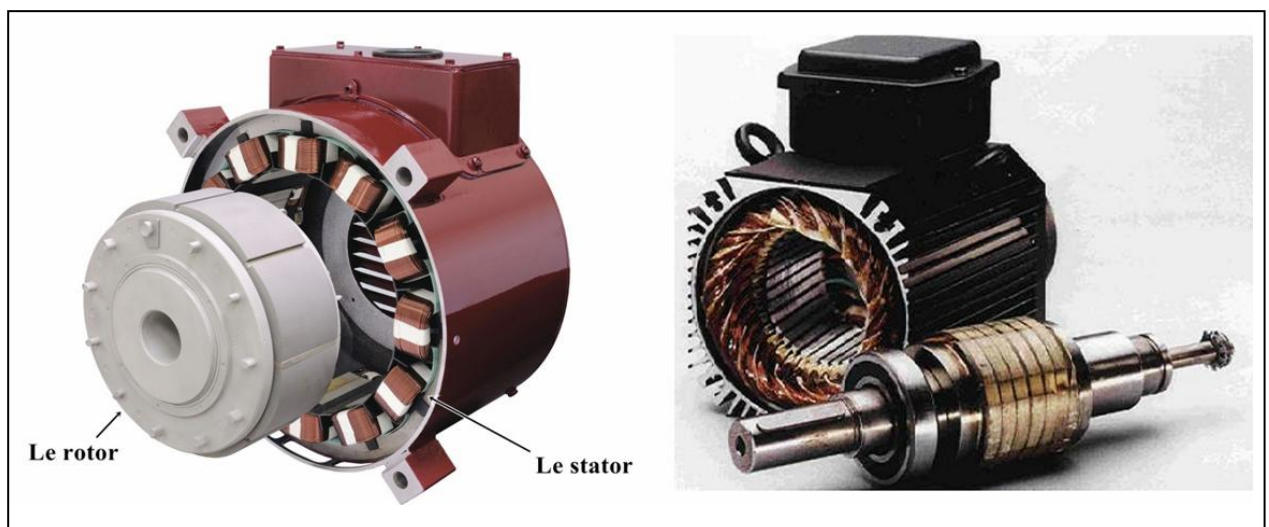


Figure.I.2 Le moteur industriel à aimants permanents

I.4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les bobines sont alimentées de façon séquentielle. Cela crée un champ magnétique tournant à la même fréquence que les tensions d'alimentation. L'aimant permanent du rotor cherche à chaque instant à s'orienter dans le sens du champ. Pour que la machine tourne, les tensions d'alimentation doivent être adaptées continuellement pour que le champ reste en avance sur la position du rotor, et ainsi créer un couple moteur et fournir une puissance mécanique [2].

I.5. LES AIMANTS PERMANENTS LES PLUS UTILISÉS POUR LES MACHINES SYNCHRONES À AIMANTS PERMANENTS

La propriété de l'aimant permanent et le choix des matériaux convenables sont cruciaux dans la conception de la machine à aimants permanents. Le choix des aimants permanents est essentiel puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple massique qu'on peut attendre de l'actionneur. Leurs performances vont souvent de pair avec leur prix de revient [1].

- **Les ferrites:**

Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée. En raison de leurs faibles valeurs d'aimantation rémanente (environ 0.4T), les ferrites sont utilisées plutôt dans des machines à aimants de faible puissance à faible coût.

- **Le samarium cobalt (SmCo₅, Sm₂Co₁₇):**

Est beaucoup plus performant en terme de densité volumique d'énergie que les autres types d'aimants de 140 à 200kJ/m³ pour le SmCo₅ et de 180 à 240[kJ/m³] pour le Sm₂Co₁₇, autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 350°C), mais il est très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition.

- **Les Alnicos :**

Ils se caractérisent par un champ rémanent très élevé et présentent une haute stabilité sous des températures extrêmes. Ils maintiennent leurs caractéristiques magnétiques entre 250°C et 450°C.

- **Les Nd-Fe-B :**

Ils ont des performances supérieures aux SmCo et sont beaucoup moins coûteux, mais leur tenue en température est moins bonne (jusqu'à 160°C) [2].

Matériaux	B _{ren} Tesla	H _c en kA/m	T° de Curie en °C	Remarque diverses
Ferrites	0.2à0.4	200	300	Les moins chers
Alnico	1.2	50	750à850	Se démagnétisent trop facilement
Samarium cobalt	0.5	800	700à800	Prix élevé à cause du cobalt
Néodyme fer bore	1.3	1500	310	Prix en baisse (brevets), sujet à l'oxydation

Tab. I.2. Tableau récapitulatif des caractéristiques des aimants

I.6. DIFFERENTS TYPES DE MACHINES A AIMANTS PERMANENTS

Il existe de nombreuses configurations du moteur synchrone à aimants permanents. La raison principale de cette diversité est que les utilisateurs ont des besoins spécifiques. Par exemple, pour la conception d'un servomoteur, l'inertie devra être la plus faible possible, afin de permettre une accélération et une décélération, la plus rapide possible.

Il sera donc préférable d'utiliser un moteur à rotor intérieur avec des aimants à hautes énergies. Tandis que, pour une application où la vitesse doit rester la plus constante possible, telle que la motorisation d'un disque magnétique, un moteur à rotor extérieur du fait de son inertie, est préférable.

Il y a trois grandes familles existant : les moteurs à rotor intérieur, à rotor extérieur ou à entrefer axial [4].

I.6.1. Moteur à rotor intérieur

Le moteur à rotor intérieur a une configuration classique. Le rotor est constitué d'aimants assemblés sur une douille magnétique. Le stator est similaire à celui des machines triphasées à induction. La figure (I.3) montre un exemple de moteur à rotor intérieur [2].

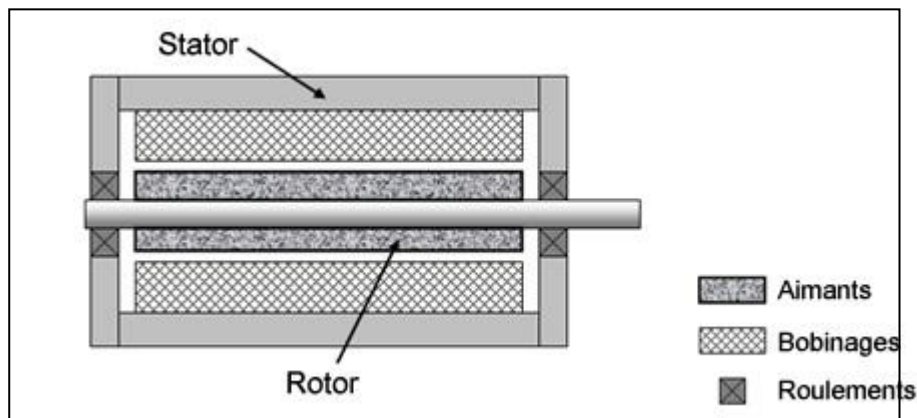


Figure I.3: Moteur à rotor intérieur

L'avantage majeur de cette structure est le ratio couple/vitesse qui est élevé. Néanmoins une difficulté de construction existe, il faut être capable de maintenir les aimants, même à vitesse élevée. Le plus souvent ils sont collés et frétés.

Ce type à plusieurs structures, on prendre un exemple :

a) Structures à aimants déposés en surface

Elles sont appelées machines à inducteur lisse en raison de leurs aimants disposés au niveau de l'entrefer sur un noyau ferromagnétique lisse. L'induction B_e dans l'entrefer est celle des aimants

Ba. Leur aimantation peut être radiale, tangentielle ou combinée.

La topologie à rotor interne est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et son faible coût de réalisation. Cependant elle présente quelques inconvénients. En effet, les aimants permanents sont exposés aux champs de démagnétisation et sont sujets à des forces centrifuges pouvant causer leur détachement du rotor [3].

La topologie à rotor externe est moins utilisée car plus difficile à réaliser et nécessite plus de volume d'aimant, présente les avantages suivants :

- Un diamètre du rotor, plus grand que pour les machines conventionnelles à flux radial, permettant d'avoir un nombre plus élevé de pôles et un couple plus grand.
- Une meilleure qualité de collage des aimants sur le rotor grâce à la force centrifuge qui pousse les aimants vers l'extérieur, rendant leur détachement presque impossible [1].

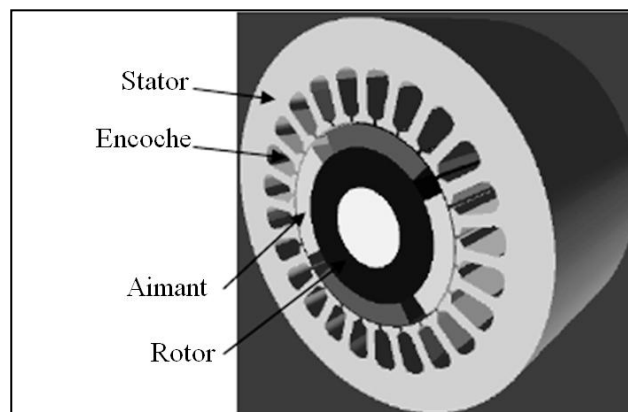


Figure I.4 Structures à aimants déposés en surface

1) Structures à aimants encastrés

Des aimants de forme simple sont insérés à la surface du rotor, ce qui leur permet d'avoir une bonne tenue mécanique (figure I.5). L'espace entre les aimants est couvert par des dents rotoriques créant une saillance inversée ($X_d < X_q$). Cette saillance produit un couple de réluctance aussi important que le couple d'interaction dû aux aimants permanents [3].

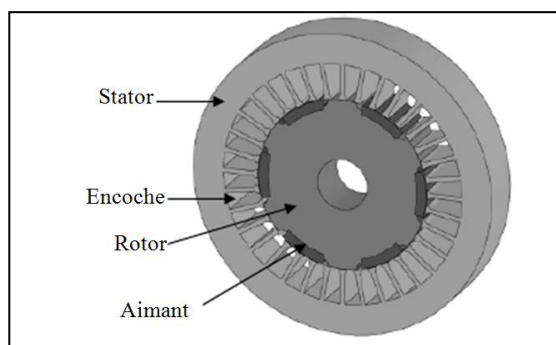


Figure I.5 : Structure à aimants encastrés.

2) Structures à aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor. La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées (voir Figure I.6), l'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique [2].

L'avantage de ces deux configurations réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation.

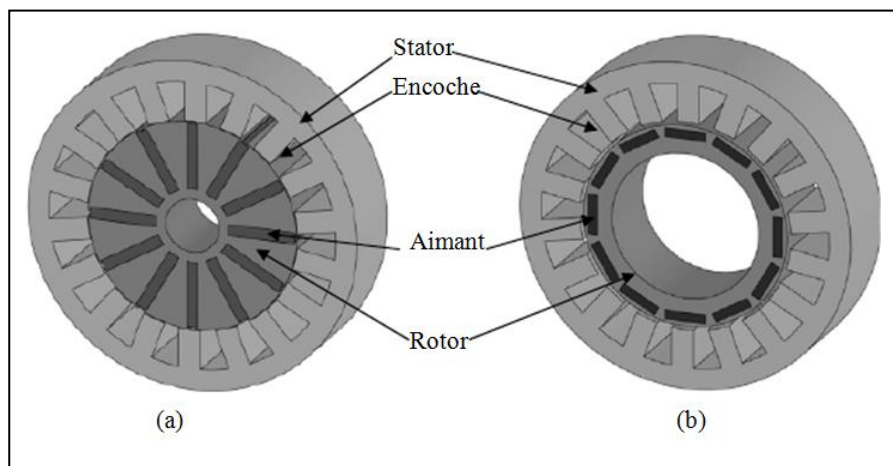


Figure I.6 : Structure à aimants enterrés :

- (a) avec concentration de flux.
- (b) structure classique.

I.6. 2. Moteur à rotor extérieur

La figure (I.7) présente la section d'un moteur à rotor extérieur. Les tôles utilisées au stator ressemblent à celle de l'induit de la machine à courant continu à balais. Ce type de stator est simple à bobiner, car le fil se bobine directement sur le stator section par section.

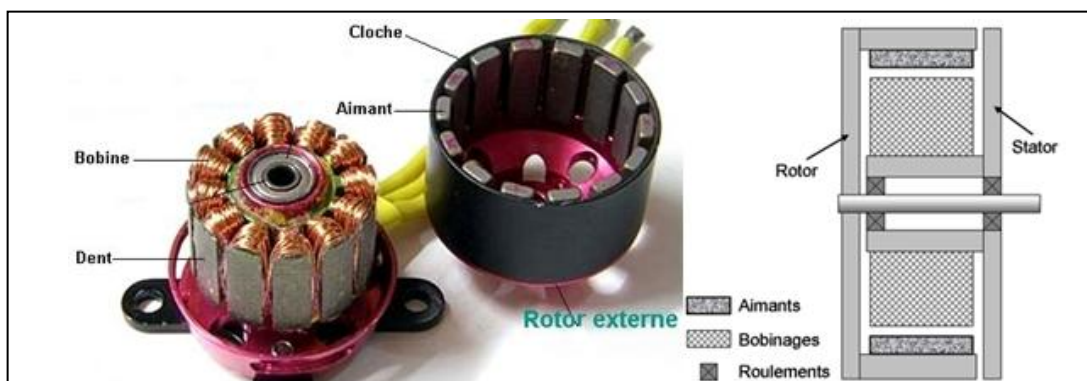


Figure I.7: Moteur à rotor extérieur

Le rotor est constitué d'aimants montés dans une cloche magnétique permettant la continuité du champ. Dans cette configuration, il n'y a plus de problème pour maintenir les aimants, car ils sont plaqués sur la cloche par l'action de la force centrifuge [4].

Cette structure est fréquemment utilisée dans les applications de ventilation pour son faible coût et sa fragilité de fabrication. Cependant, les machines à rotor extérieur ne sont utilisées que pour des applications à vitesse constante [4].

I.7. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS :

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines, Parmi ces avantages, on peut citer [2]:

- Meilleures caractéristiques thermiques, la localisation des pertes joules et des pertes fer au stator simplifie le refroidissement de la machine.
- Puissances massique et volumique importantes.
- Un rendement et facteur de puissance élevé.
- Aucun courant d'excitation (30% de pertes en moins).
- Une capacité à fonctionner à haute, voire très haute vitesse

Cependant ils ont tout de même certains inconvénients :

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants (250 °C pour le samarium-cobalt)
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Difficulté de défluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position).
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine.
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.

I.8. LES APPLICATIONS DES MSAP :

Ces machines ont trouvé un vaste champ d'applications dans plusieurs domaines (équipement domestique, lecteurs CD/DVD et disques durs d'ordinateur, voiture et vélo électriques,

etc..). Celles-ci sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts. **La figure I.8** illustre quelques applications de ces machines [3].



Figure I.8 : Principales applications des MSAP

I.10. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté succinctement les différentes structures de MASP (machines synchrones à aimants permanents) en rapportant les différents types d'aimants permanents ainsi que les types du rotor. Aussi les avantages et les inconvénients de cette machine et enfin quelques exemples dans l'industrie.

Chapitre II

II.1. INTRODUCTION

La machine PDD est une extension de pionnier de l'engrenage magnétique de faible rapport et a été inventé et démontré par le personnel Magnomatics en 2005 et est largement considéré comme l'avancée la plus significative dans la conception de la machine électrique pendant 20 ans. Cette technologie de rupture du sol combine la densité de couple élevée de la roue magnétique et de la fonctionnalité et de la performance d'une machine à aimant permanent sans balai à offrir sortie de couple sans précédent pour des applications d'entraînement direct.

Machines électriques classiques ne peuvent atteindre une sortie de couple relativement faible en raison des limites de contraintes magnétiques et électriques qui peuvent être utilisés. Pour les systèmes compacts, transmission mécanique est souvent nécessaire pour correspondre à une machine de faible couple à haute vitesse à sa charge, qui introduit le besoin de lubrification, refroidissement, entretien et le risque de défaillance catastrophique et blocage en cas de surcharge.

La machine PDD est une intégration élégante et extrêmement compact magnétique et mécanique d'un engrenage magnétique de faible rapport et un aimant permanent du moteur / générateur sans balais. Cette machine intégré a une densité inégalée de couple, qui est plusieurs fois supérieure à une machine à aimants permanents à hautes performances, et se traduit par un entraînement électrique compact qui ne nécessite pas de lubrification auxiliaire ou les systèmes de refroidissement.

Dans ce chapitre, on va représenter la conception de la machine Pseudo Direct Drive (PDD) et quelques applications, et enfin les avantages de cette machine.

II.2. GENERALITE SUR L'ENGRENAGE MAGNETIQUE

Les engrenages mécaniques et les trains planétaires mécaniques ont de nombreuses applications dans les machines industrielles et dans la transmission des puissances mécaniques. A titre d'exemple, pour améliorer l'économie de carburant et réduire les émissions de gaz nocifs, les véhicules hybrides sont de plus en plus utilisés et comportent des engrenages planétaires mécaniques pour gérer et transmettre les vitesses et les couples des différents actionneurs [5].

Bien que l'utilité des engrenages mécaniques soit importante, ils ont des problèmes inhérents aux frottements de contact qui engendrent bruit, chaleur et usure. Les engrenages magnétiques peuvent être les solutions à ces problèmes mécaniques. Par conséquent, plusieurs auteurs ont proposé des nouveaux trains magnétiques pour remédier à ces inconvénients [7].

Les engrenages magnétiques ont d'abord été développés en utilisant des ferrites de faible énergie qui ne permettent de transmettre que des faibles couples. Aujourd'hui, des aimants à hautes

énergies (Nd-Fe-B) permettent la transmission de couples beaucoup plus élevés. La combinaison d'une machine électrique avec un engrenage magnétique sans contact autorise un environnement propre et un fonctionnement à faible bruit [11].

Un mécanisme de transmission utilisant un engrenage magnétique sans contact (en anglais Non contact Magnetic Gear : NCMG) a été proposé en 1991 par K. Ikuita. Le système de NCMG offre un grand potentiel pour des applications médicales et des systèmes de micro transmission [8].

Les réducteurs magnétiques plus simples, qui ont déjà existés, mais qui ont une faible densité de couple, un faible rapport de vitesse et un seul mode transmission. La figure II.1.a montre un exemple de ce type de transmission [5].

En 2001, K. Atallah est proposé un nouveau train magnétique. Il a une densité de couple transmis de plus de 100 kNm/m³, avec un rapport de vitesse de 5,5:1. Le rotor interne et le rotor externe sont en interaction magnétique à travers les pièces polaires ferromagnétiques [7].

En 2005, O. Rasmussen est modifié le train magnétique précédent par le remplacement des aimants montés en surface du rotor interne par des aimants intérieurs pour former un system à concentration de flux comme le montre la figure II.2.d. Ce réducteur magnétique a une densité élevée de couple avec le même rapport de vitesse que le précédent [6].

Un train planétaire magnétique, qui est une copie du train planétaire mécanique, a été étudié et réalisé en 2008 par C. Huang (figure II.2.e). Les auteurs ont montré la faisabilité du concept, mais la densité de couple de ce train magnétique semble être très faible en comparaison avec celle du train mécanique [10].

Récemment, le réducteur magnétique a été intégré dans les moteurs à aimants permanents pour obtenir ce qu'on appelle un entraînement direct (en anglais direct-drives) à forte densité de couple. Ces actionneurs sont appropriés pour appliquer le couple à faible vitesse comme dans les véhicules électriques. Ils permettent de réduire la vitesse et d'amplifier le couple d'environ 7 fois. Ce moteur peut facilement être développé pour différentes tailles de véhicules électriques [11].

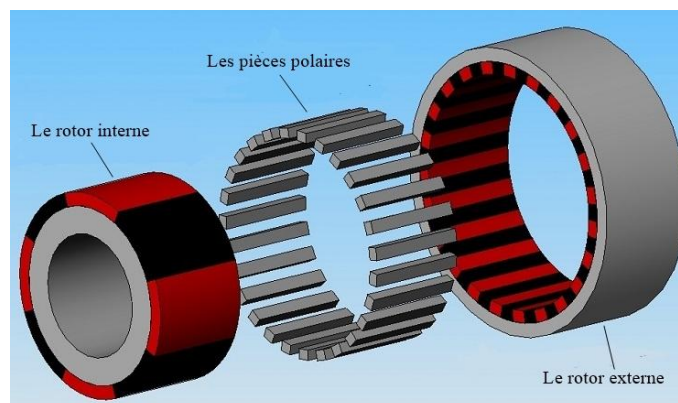


Figure II.1. Le train magnétique

Les nombreux modèles présentés dans la figure ont chacun des avantages et des inconvénients selon que l'on considère, individuellement au globalement, la valeur du couple transmis, le rapport des vitesses et le nombre de modes de fonctionnement.

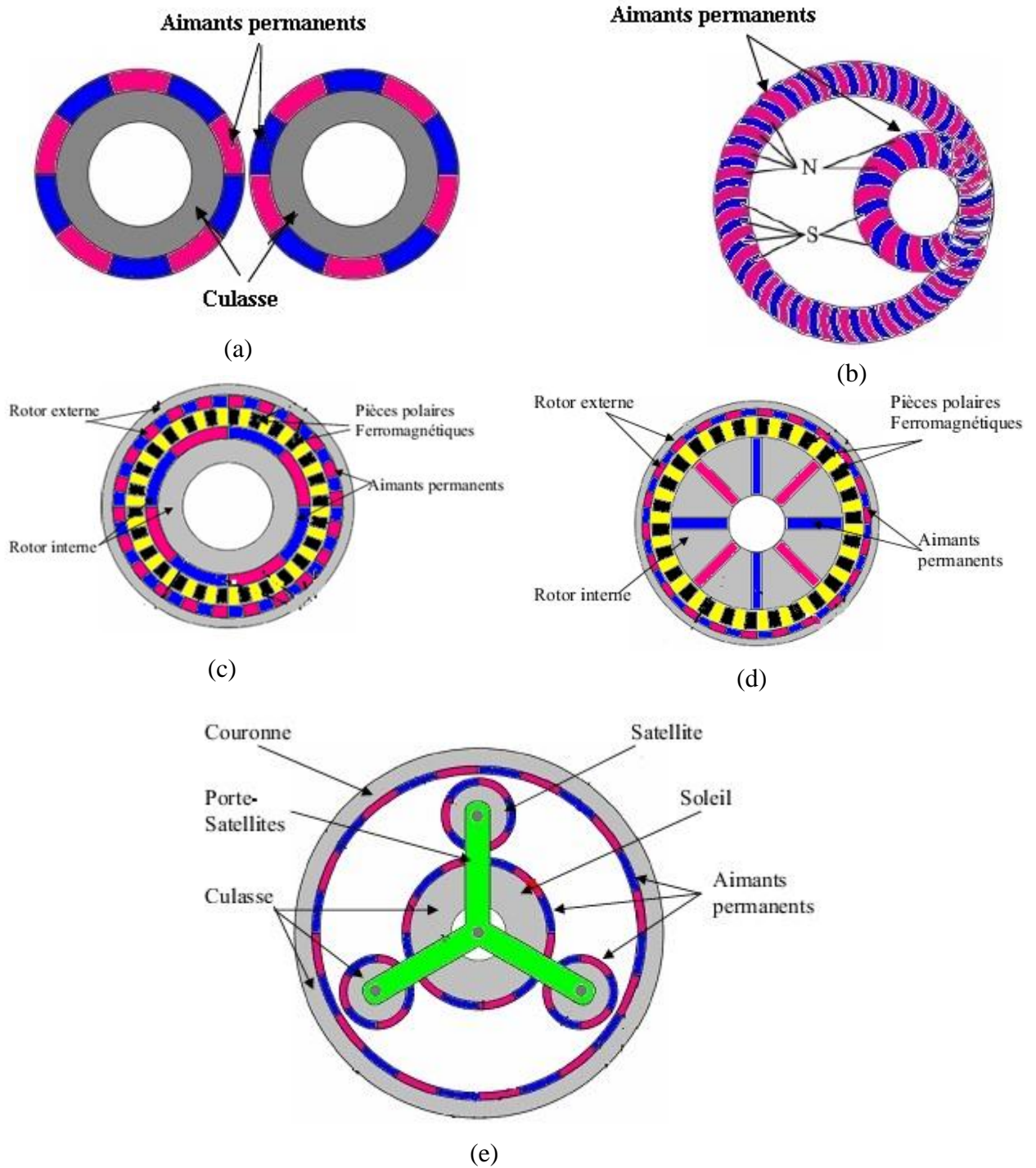


Figure II.2 Modèles de réducteurs magnétiques

II.2.1. ROUE D'ENGRENAGE MAGNETIQUE

J'appellerai roue d'engrenage magnétique une roue sur la circonférence de laquelle sont disposés $2n$ pôles magnétiques égaux, équidistants et alternativement nord et sud. On obtient de pareilles roues en disposant convenablement sur un disque non magnétique n aiguilles aimantées suivant les côtés d'un polygone régulier de $2n$ côtés, pris de deux en deux (type polygonal) ou $2n$ aiguilles suivant les rayons de ce polygone (type radial) ou encore en implantant $2n$ aiguilles perpendiculairement au plan du disque (type prismatique). On dira que la roue a n dents, la dent étant la distance angulaire de deux pôles homologues les plus voisins [11].

II.2.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

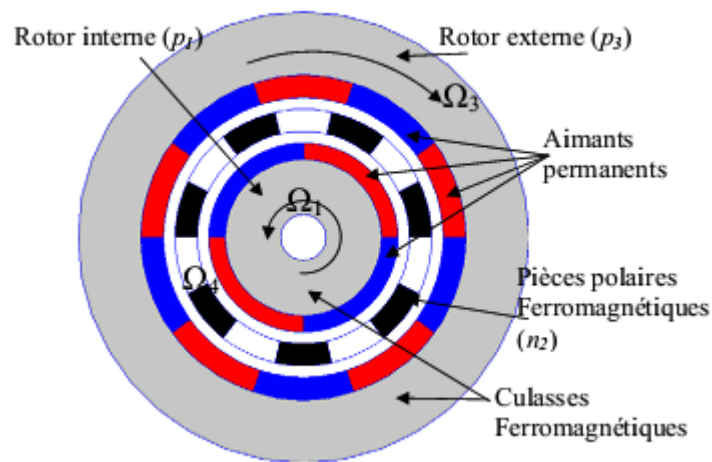


Figure II.3 Schéma du train planétaire magnétique

La figure II.3 montre le schéma du train magnétique qui offre plus de modes de fonctionnements et un couple volumique plus élevé. Le train magnétique se compose d'un rotor interne et d'un rotor externe. Chaque rotor a une culasse ferromagnétique et un nombre différent des pôles d'aimants permanents. Il y a un nombre de pièces polaires ferromagnétiques entre les deux rotors.

L'originalité du fonctionnement du train planétaire magnétique est la modulation des champs magnétiques produits par chacun des rotors à aimants permanents par les pièces polaires ferromagnétiques.

II.2.3. LES AVANTAGES PAR RAPPORT AU REDUCTEUR MECANIQUE

La figure II.3 montre un réducteur magnétique et une autre mécanique. On constate qu'il y a plusieurs avantages avec le réducteur à engrenages magnétiques par rapport au réducteur mécanique:

- Pas de fatigue mécanique
- Pas de lubrification
- Protection naturelle contre les surcharges
- Pas de pertes dues aux contacts mécaniques
- Pas de bruit acoustique
- Rendement très élevé
- Couple volumique beaucoup plus important que pour une machine électrique classique.

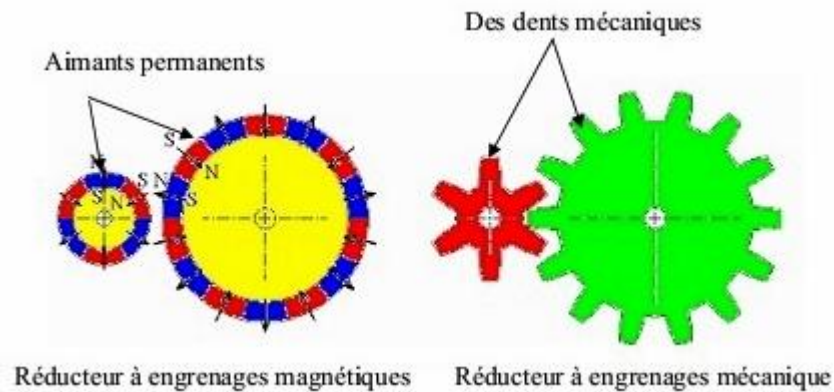


Figure II.4 Réducteur magnétique et mécanique

II.3. LA CONCEPTION DE LA MACHINE PDD

II.3.1. Structure de la machine PDD

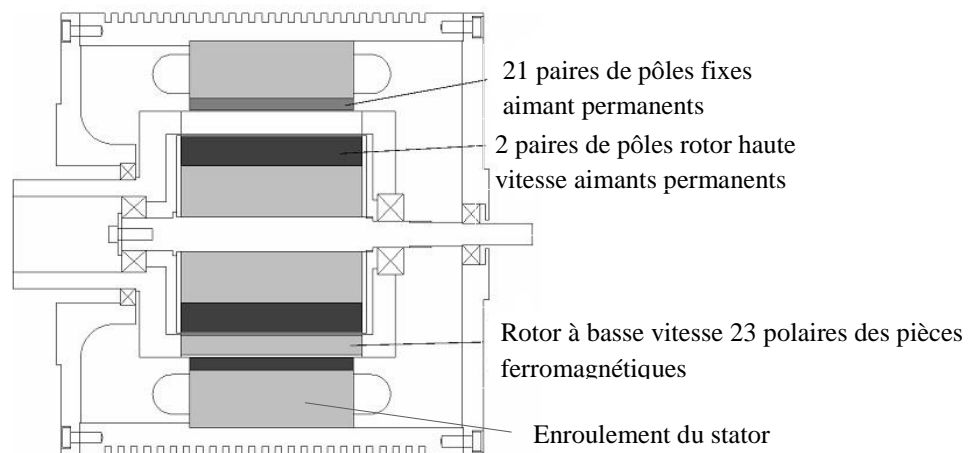


Figure II.5 Coupe axiale de la PDD

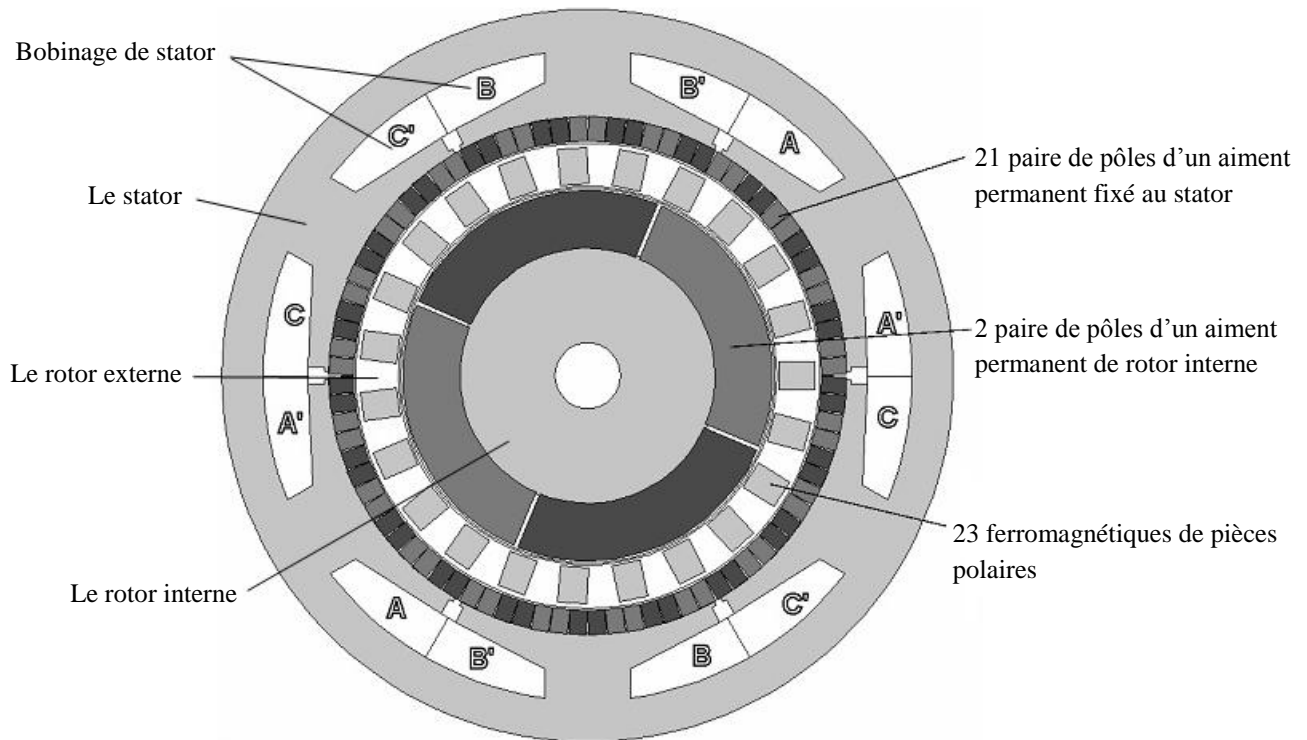


Figure II.6 Coupe radiale de la PDD

La PDD est constitué de deux parties :

- 1) **Partie fixe (Le stator classique) :** Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique d'un empilage de tôles en acier entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages disposées à 120° l'une de l'autre et alimenté par un réseau triphasé, crée dans l'entrefer un champ magnétique radial tournant. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôles feuilletées afin de limiter les courants de Foucault. aussi il y a un cylindre des aimants permanent placer cote a coté mais en tête bèche fixé avec le stator pour valide le fonctionnement désiré.
- 2) **Partie mobile :** constitué de deux parties
 - a) **Rotor interne:** se compose de 2 paires de pole d'aimant permanent fixe sur un circuit magnétique
 - b) **Rotor externe:** se compose de 23 ferromagnétiques de pièces polaires entières dans cylindre de matière diamagnétique.

Pour la machine PDD, l'aimant utilise est le Néodyme-Fer-Bore également connu sous le nom de Nd-Fe-B, est un alliage de néodyme, de fer et de bore.les aimants en néodyme sont le type le plus fort de l'aimant permanent disponible dans le commerce. Ils ont remplacé d'autres types de aimant dans les nombreuses applications dans les produits modernes qui nécessitent un fort aimant

permanent, comme les moteurs à outils sans fil, lecteurs de disques durs et de fixations magnétiques.



Figure II.8 Plusieurs formes de Néodyme-Fer-Bore

II.3.2. Dimensionnement de la machine pseudo direct drive

Comme toutes les machines ont des dimensions bien définies, la machine PDD a des dimensions plus spéciales. Le tableau II.1 représente les dimensions de cette machine.

Dimensions de la machine PDD	
R_{int}	30 mm
H_{as}	7.2 mm
L_{as}	11.2 mm
H_{ar}	20 mm
H_{ext}	18 mm
L_{pf}	17 mm
L_s	40.8 mm
E_{int}	0.75 mm
E_{ext}	0.45 mm
L_{dnt}	7.1 mm

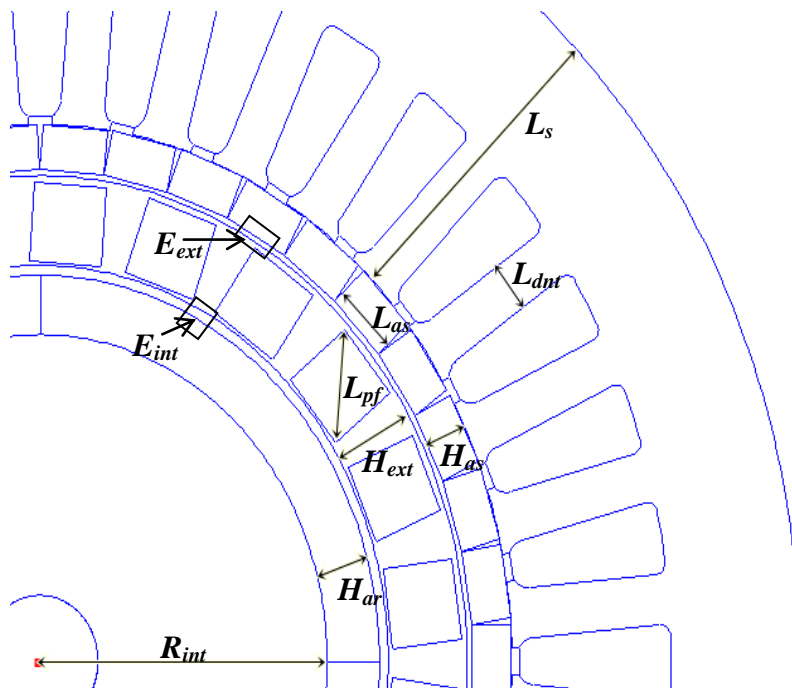


Tableau II.1. Dimensionnement de la machine Pseudo Direct Drive

II.3.3. Principe de fonctionnement de la machine PDD

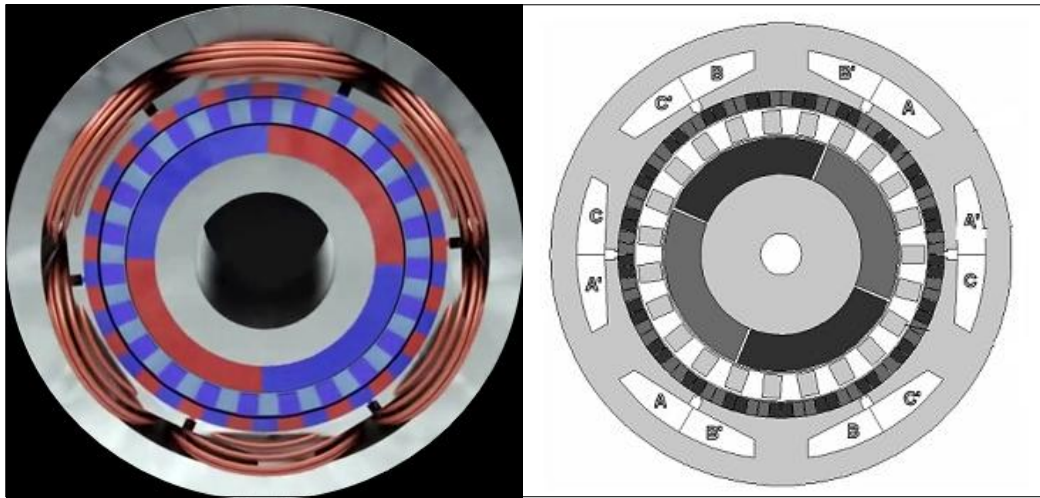


Figure. II.7 Schéma du la PDD

La figure II.2 montre le schéma du la PDD qui offre plus de modes de fonctionnements et un couple volumique plus élevé. Le train magnétique se compose d'un rotor interne et d'un rotor externe. Chaque rotor a une culasse ferromagnétique et un nombre différent des pôles d'aimants permanents. Il y a un nombre de pièces polaires ferromagnétiques entre les deux rotors. Le couple électromagnétique est produit par l'interaction des deux aimants de pôles paire ($ph = 2$) sur le rotor à grande vitesse avec les courants dans le bobinage du stator. Ce couple est transmis au rotor à faible vitesse, avec un rapport d'engrenage $Gr = ns / ph$, par l'interaction de la paire de pôles 21 ($j=21$) des aimants permanents stationnaires et l'harmonique de l'espace 21 qui résulte de la modulation de l'champ magnétique 2 paires de pôles sur le rotor haute vitesse par les 23 ($ns=23$) ferromagnétiques pièces polaires du rotor de sortie à basse vitesse.

Le rotor interne, bague magnétique statique et segments d'acier forment le train magnétique. Lorsque le PDD fonctionne comme un moteur, le courant à travers ses enroulements provoque le rotor à grande vitesse interne à tourner. Ce champ tournant est modulé par les segments ferromagnétiques et crée un champ se déplaçant plus lentement, parce que les aimants extérieurs sont fixés sur le stator, le rotor provoque la modulation de tourner à une vitesse plus lente et avec un couple plus élevé que le rotor interne libre de filage.

II.4. LES AVANTAGES DE LA MACHINE PDD

- Une réduction significative de la taille sur machine à commande directe classique
- Ultra haute efficacité élimine le besoin de refroidissement auxiliaire

- Une maintenance réduite et une meilleure fiabilité par rapport aux disques adaptés mécaniquement
- Protection contre les surcharges de couple inhérent
- Facteur de puissance élevé (typiquement $> 0,9$)
- Emploi puissance norme contrôleurs électroniques
- Possibilité pour les deux arbres de sortie avec différentes vitesses de rotation

Les machines électriques classiques ne peuvent atteindre une sortie de couple relativement faible en raison des limites de contraintes magnétiques et électriques qui peuvent être utilisés. Pour les systèmes compacts, transmission mécanique est souvent nécessaire pour correspondre à un / machine de faible couple à haute vitesse à sa charge, qui introduit le besoin de lubrification, refroidissement, entretien et le risque de défaillance catastrophique et blocage en cas de surcharge.

La machine PDD est une intégration élégante et extrêmement compact magnétique et mécanique d'un engrenage magnétique de faible rapport et un aimant permanent du moteur / générateur sans balais. Cette machine intégré a une densité inégalée de couple, qui est plusieurs fois supérieure à une machine à aimants permanents à hautes performances, et se traduit par un entraînement électrique compact qui ne nécessite pas de lubrification auxiliaire ou les systèmes de refroidissement.

II.5. APPLICATIONS

Pour une nouvelle machine s'a plusieurs applications

- Convoyeurs et bandes transporteuses.
- Outils De Coupe.
- Mélangeurs.
- Agitateurs.
- Les Broyeurs A Boulets.
- Vannes De Contrôle Des Fluides.
- Robotiques.
- Machines-Outils.
- Lecteurs De Broche.
- Les systèmes de propulsion marine.
- Les véhicules hybrides.

II.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté succinctement une généralité sur l'engrenage magnétique et la structure de la machine PDD (pseudo direct drive), et en rapportant le type d'aimants permanents utilisé. Aussi les avantages et les inconvénients de cette machine et enfin quelques applications dans l'industrie.

Chapitre III

III.1.INTRODUCTION

FEMM : Finite Element Method Magnetics ou Méthode des éléments Finis Magnétique c'est un ensemble des programmes pour résoudre des problèmes électromagnétiques basse fréquence sur deux dimensions planes et axisymétriques domaines. Le programme s'adresse actuellement linéaire / non linéaire des problèmes de magnétostatique, linéaire / problèmes magnétiques harmoniques de temps non linéaire, les problèmes électrostatiques linéaires, et des problèmes de flux de chaleur en régime stationnaire.

FEMM est divisé en trois parties:

- **Shell interactif (femm.exe)**

- **triangle.exe** : Triangle se décompose de la région de la solution dans un grand nombre de triangles, une partie essentielle du processus des éléments finis.

- **solveurs**

Le FEMM capable de résoudre plusieurs types des problèmes sont :

- Magnetics problems \ les problèmes Magnétiques
- Electrostatics problems \ les problèmes Electrostatiques
- Heat Flow problems \ les problèmes de flux de chaleur
- Current Flow problems \ les problèmes de Débit actuel

Le but de ce chapitre est de donner une brève explication de l'utilisation de programme FEMM et de fournir plus de détails pour aider à résoudre les problèmes magnétique

III.2.GENERALITE

Le but de cette section est de donner à l'utilisateur une brève description des problèmes que résout FEMM. Cette information n'est pas vraiment essentielle si vous n'êtes pas particulièrement intéressé par l'approche que FEMM prend à la formulation des problèmes.

Une certaine familiarité avec l'électromagnétisme et les équations de Maxwell est supposé, car un examen de ce matériel est au-delà de la portée de ce manuel. Cependant, l'auteur a trouvé plusieurs références qui ont été utiles à la compréhension de la dérivation et de la solution des équations de Maxwell dans diverses situations. Un très bon texte de niveau d'introduction pour les problèmes magnétiques et électrostatiques est de l'électromagnétisme appliqué de Plonus [12]. Un bon examen de niveau intermédiaire des équations de Maxwell, ainsi que d'une analogie utile de magnétisme à des problèmes similaires dans d'autres disciplines est contenu dans l'analyse et la conception de dispositifs électromagnétiques de Hoole assistée par ordinateur. Pour un traitement de pointe, le lecteur n'a aucun recours mais de se référer à l'électrodynamique classique de Jackson .Pour les problèmes thermiques , l'auteur a trouvé la chaleur de blanc et transfert de masse et Ele -taire de Haberman appliquée équations aux dérivées partielles pour être utile dans la compréhension de la dérivation et la solution des problèmes de température à l'état stationnaire [13].

III.3. LES PROBLÈMES MAGNETOSTATIQUE

FEMM traite de certains cas limites des équations de Maxwell. Les problèmes de magnétisme abordés sont ceux qui peuvent être considéré comme des «problèmes de basse fréquence», dans lequel les courants de déplacement peuvent être ignorés. Courants de déplacement sont généralement pertinentes pour les problèmes magnétiques qu'à des fréquences radio [15].

Les problèmes magnétostatiques est des problèmes dans les domaines qui sont constantes dans le temps. Dans ce cas, l'intensité de champ (H) et la densité de flux (B) doit obéir:

$$\nabla \times H = J \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.2)$$

L'objet d'une relation constitutive entre B et H pour chaque matériau:

$$B = \mu H \quad (1.3)$$

Si un matériau est non linéaire (par exemple de fer de saturation ou aimants alnico), la perméabilité, μ est en fait une fonction de B:

$$\mu = B/H (B) \quad (1.4)$$

FEMM va de trouver un terrain qui satisfait (1.1) - (1.3) via une approche potentiel vecteur magnétique. Densité de flux est écrit en termes de potentiel vecteur A , comme:

$$B = \nabla \times A \quad (1.5)$$

Or, cette définition de B toujours satisfait (1.2). Puis, (1.1) peut être réécrite comme:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (1.6)$$

Pour un matériau isotrope linéaire (et en supposant que la jauge de Coulomb, $\nabla \cdot A = 0$), équation (1.6) se réduit à:

$$-\left(\frac{1}{\mu} \nabla^2 A \right) = J \quad (1.7)$$

FEMM conserve la forme de (1.6), de sorte que les problèmes magnétostatiques ayant une relation de $B-H$ non linéaire peuvent être résolus.

III.4. ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS

Bien que les équations différentielles d'intérêt semblent relativement compactes, il est généralement très difficile d'obtenir des solutions à forme fermée pour tous, mais les géométries simples. C'est là que l'analyse par éléments finis entre en jeu. L'idée des éléments finis est de décomposer le problème en un grand nombre de régions, chacune avec une géométrie simple. Par exemple, la figure III.1 montre une carte du Massachusetts décomposée en triangles. Au cours de ces régions simples, la «vraie» solution pour le potentiel souhaité est approximée par une fonction très simple. Si suffisamment de petites régions sont utilisées, le potentiel approximatif correspond étroitement à la solution exacte [14].

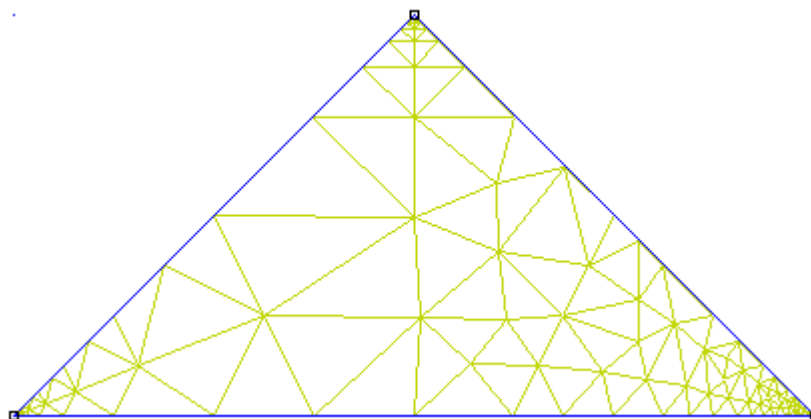


Figure III.1 Triangulation of Massachusetts

L'avantage de briser le domaine en un certain nombre de petits éléments est que le problème se transforme d'un petit mais difficile à résoudre le problème dans un grand mais relativement facile à

résoudre le problème. Grâce au processus de discrétisation, un problème d'algèbre linéaire est formé avec peut-être des dizaines de milliers d'inconnus. Cependant, il existe des algorithmes qui permettent au problème d'algèbre linéaire résultant à résoudre, généralement dans un court laps de temps [3].

Plus précisément, FEMM discrétise le domaine du problème en utilisant des éléments triangulaires. Au cours de chaque élément, la solution est approximée par une interpolation linéaire des valeurs de potentiel au niveau des trois sommets du triangle. Le problème d'algèbre linéaire est formé en minimisant une mesure de l'erreur entre l'équation différentielle exacte et l'équation différentielle approximative comme écrit en termes de fonctions d'essai linéaires [15].

III.5. MAGNÉTIQUES PRÉPROCESSEUR [13]

Le préprocesseur est utilisé pour dessiner la géométrie des problèmes, la définition des matériaux, et la définition des conditions aux limites. Une nouvelle instance du préprocesseur peut être créée en sélectionnant File | New hors du menu principal, puis en sélectionnant "Magnétique problème" de la liste des types de problèmes qui apparaît alors.

Dessin d'une géométrie valide se compose généralement de quatre (bien que pas nécessairement séquentiel) tâches:

- Etablir les extrémités des lignes et des segments d'arc qui forment un dessin.
- Relier les points de terminaison soit avec des segments de ligne ou des segments d'arc
- Ajout de marqueurs "Bloc d'étiquettes" dans chaque section du modèle pour définir les propriétés des matériaux et maille dimensionnement pour chaque section.
- Définition des conditions aux limites sur les bords extérieurs de la géométrie.

Cette section décrit exactement comment on va sur l'exécution de ces tâches et de créer un problème qui peut être résolu.

III.5.1. Preprocessor Drawing Modes \ Préprocesseur Dessin modes

La clé pour utiliser le préprocesseur est que le préprocesseur est toujours dans l'un des cinq modes: le mode point, le mode de segment, le mode de segment d'arc, le mode de bloc, ou le mode de groupe. Les quatre premiers modes correspondent aux quatre types d'entités qui définissent la géométrie de problèmes: les nœuds qui définissent tous les coins de la géométrie de solution, segments de droite et des segments d'arc qui relient les nœuds pour former limites et des interfaces, et des étiquettes de bloc qui dénotent ce les propriétés du matériau et de la taille des mailles sont associées à chaque région de la solution. Lorsque le préprocesseur est en l'un des premiers quatre

modes de dessin, les opérations d'édition ont lieu uniquement sur le type d'entité sélectionnée. Le cinquième mode, le mode de groupe, est destiné à coller les différents objets entre eux en parties de telle sorte que des parties entières peuvent être manipulées plus facilement.



Figure III.2 les boutons Dessin dans la barre d'outils.

III.5.2. Keyboard and Mouse Commands \ Clavier et souris commandes

Bien que la plupart des tâches qui doivent être effectuées soient disponibles via la barre d'outils, certaines fonctions importantes sont invoquées que par l'utilisation des "touches".

De même, les fonctions spécifiques sont associées à l'entrée de bouton de la souris. L'utilisateur utilise la souris pour créer de nouveaux objets, sélectionnez objets qui ont déjà été créés, et se renseigner sur les propriétés des objets.

III.5.3. View Manipulation \ Voir Manipulation

En règle générale, l'utilisateur a besoin de la taille ou déplacer le point de vue de la géométrie du problème affiché sur l'écran. La plupart des commandes de manipulation de vue sont disponibles via les boutons sur la barre d'outils de préprocesseur. La fonctionnalité de peut généralement également accessible via la «manipulation de l'affichage Touches». Les boutons de la barre d'outils de manipulation de vue sont représentés dans la figure III.3.



Figure III.3 les boutons de la barre d'outils de manipulation.

III.5.4. Grid Manipulation \ Grille Manipulation

Pour aider à l'élaboration de votre géométrie, un outil utile est la grille. Lorsque la grille est en service, une grille de pixels de lumière bleue sera affichée sur l'écran. L'espacement entre les points de la grille peut être spécifié par l'utilisateur, et le pointeur de la souris peut être fait pour "casser" du point de grille le plus proche. La meilleure façon de manipuler la grille est utilisé à travers le des boutons de la barre d'outils Grille de manipulation.

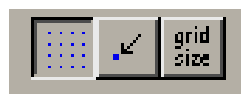


Figure III.4 les boutons grille de la barre d'outils de manipulation.

III.5.5. Edit \ Modifier

Plusieurs tâches utiles peuvent être effectuées via le menu Edition hors du menu principal. Peut-être le plus fréquemment utilisé est la commande Annuler. Le choix de cette sélection annule la dernière addition ou la suppression que l'utilisateur a faite de la géométrie de l 'modèle.

Pour sélectionner plusieurs objets rapidement, la commande **Select Group** est utile. Cette commande permet à l'utilisateur de sélectionner des objets de type courant située dans une zone rectangulaire arbitraire. Lorsque cette commande est sélectionnée, déplacez le pointeur de la souris dans un coin de la région qui doit être sélectionné. Appuyez et maintenez enfoncé le bouton gauche de la souris. Ensuite, faites glisser le pointeur de la souris dans le coin en diagonale opposée de la région. Une boîte rouge apparaît, indiquant la région d'être sélectionnés. Lorsque la région désirée a été spécifié, relâchez le bouton gauche de la souris. Tous les objets de type courant complètement contenue dans la boîte seront sélectionnés.

Tous les objets qui sont actuellement sélectionnés peuvent être déplacés, copiés ou collés. Pour déplacer ou copier des objets sélectionnés, il suffit de choisir la sélection correspondant au large de menu Edition de menu principal. Un dialogue s'affiche pour un montant de déplacement ou de rotation.

III.5.6. Definition of Properties \ Définition du problème

La définition de type de problème est spécifiée par le choix de la sélection d'un problème hors du menu principal. La sélection de cette option ouvre la boîte de dialogue de définition du problème, montré à la figure III.5.

Le premier choix est la liste déroulante **Problem Type**. Cette liste déroulante permet à l'utilisateur de choisir parmi un problème 2-D plane (la sélection **Planar**), ou un problème de révolution (la sélection axisymétrique\ **Axisymmetric**).

Suivant est la liste **Length Units** de chute. Cette boîte indique quelle unité est associée aux dimensions prescrites dans la géométrie du modèle. Actuellement, le programme prend en charge les pouces, millimètres, centimètres, mètres, mils, et μ meters.

La première zone d'édition dans la boîte de dialogue est **Frequency (Hz)**. Pour un problème magnétostatique, l'utilisateur doit choisir une fréquence de zéro. Si la fréquence est différente de zéro, le programme va effectuer une analyse harmonique, dans lequel toutes les grandeurs de champ sont oscillantes à cette fréquence prescrite. La fréquence par défaut est égale à zéro.

La deuxième zone d'édition est la spécification de profondeur \ **Depth**. Si un problème **Planar** est sélectionné, cette zone de texte devient permise. Cette valeur correspond à la longueur

de la géométrie dans la "dans la page" direction. Cette valeur est utilisée pour étendre les résultats intégrés dans le post-processeur (par exemple, de la force, inductance, etc.) à la longueur appropriée. Les unités de la sélection de la profondeur sont les mêmes que les unités de longueur sélectionnés. Pour les fichiers importés à partir de la version 3.2, la profondeur est choisie de telle sorte que la profondeur est égale à 1 mètre, étant donné que dans la version 3.2, tous les résultats des problèmes **planar** sont rapportés par mètre.

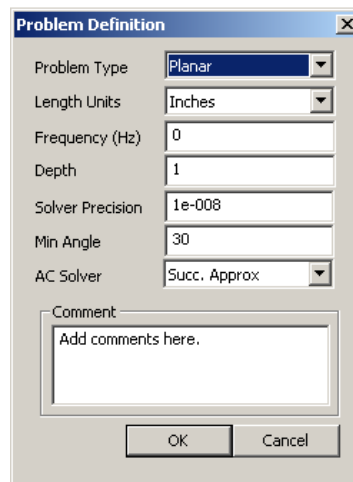


Figure III.5 Dialogue de Définition du problème

La troisième zone d'édition est la zone d'édition **Solver Precision**. Le nombre dans cette zone de texte précise les critères d'arrêt pour le solveur linéaire. Le problème d'algèbre linéaire peut être représentée par:

$$Mx = b$$

Où M est une matrice carrée, b est un vecteur, et x est un vecteur d'inconnues à déterminer. La valeur de précision du solveur détermine la valeur maximale admissible pour $\|b - Mx\| / \|b\|$. La valeur par défaut est 10^{-8}

La quatrième zone d'édition est marquée **Min Angle**. L'entrée dans cette zone est utilisée comme une contrainte dans le programme de maillage Triangle. Triangle ajoute des points à la maille afin de s'assurer qu'aucun des angles ne plus petits que l'angle spécifié se produit. Si l'angle minimum est de 20,7 degrés ou plus petit, l'algorithme de triangulation est théoriquement garantie de mettre fin (en supposant infinie précision arithmétique - Triangle peut ne pas terminer si vous manquez de précision). Dans la pratique, l'algorithme réussit souvent à angles minimaux jusqu'à 33,8 degrés. Pour les treillis hautement raffinées, cependant, il peut être nécessaire de réduire l'angle minimal bien en dessous de 20 pour éviter les problèmes associés à l'insuffisante précision à virgule flottante. La zone d'édition accepte des valeurs comprises entre 1 et 33,8 degrés.

Enfin, il ya une zone d'édition de commentaire facultatif(**Comment**). L'utilisateur peut entrer dans un texte de quelques lignes qui donnent une brève description du problème qui est résolu. Ceci est utile si l'utilisateur exécute plusieurs petites variations sur une géométrie donnée.

III.5.7. Definition of Properties \ Définition des Propriétés

Pour faire une définition du problème résoluble, l'utilisateur doit déterminer les conditions aux limites, propriétés des matériaux en bloc, et ainsi de suite. Les différents types de propriétés définies pour un problème donné sont définis par la sélection des propriétés hors du menu principal.

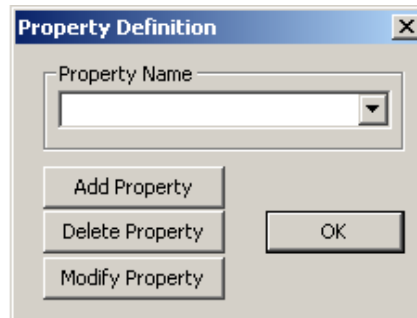


Figure III.6 boîte de dialogue de définition de propriété

Lorsque la sélection Propriétés est choisie, un menu déroulant apparaît qui a sélections pour les matériaux, Limite, Point, et Circuits. Lorsque l'un quelconque de ces sélections est choisi, la boîte de dialogue illustrée à la figure III.6 apparaît. Cette boîte de dialogue est le gestionnaire pour un type particulier de propriétés. Toutes les propriétés actuellement définies sont affichés dans la liste déroulante Nom de la propriété à la partie supérieure de la boîte de dialogue. Au début d'une nouvelle définition du modèle, la boîte est vide, car aucun bien n'a encore été défini.

III.5.8. Boundary Properties \ Propriétés des limites

Boundary Properties boîte de dialogue permet de spécifier les propriétés des segments ou des segments d'arc qui sont comme des limites du domaine de solution. Quand une nouvelle limite de propriété est ajoutée ou modifié une propriété existante, la boîte de dialogue des limites de la propriété illustré à la figure III.7 apparaît.

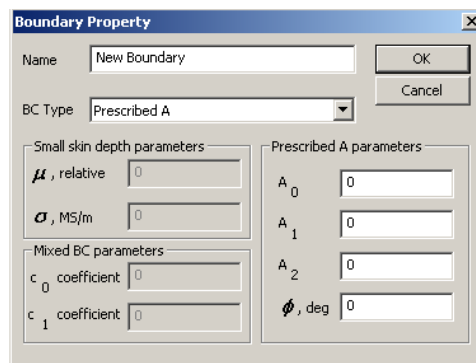


Figure III.7 boîte de dialogue Propriété des limites.

La première sélection dans la boîte de dialogue est le nom de la propriété. Le nom par défaut est «New Boundary," mais vous devez changer ce nom pour quelque chose de plus descriptif de la frontière qui est défini. La sélection suivante est la liste déroulante Type de BC. Elle spécifie le type de condition à la limite.

III.5.9. Materials Properties \ Les propriétés des matériaux

La boîte de dialogue propriété de bloc est utilisé pour spécifier les propriétés d'être associés aux étiquettes de bloc. Les propriétés spécifiées dans cette boîte de dialogue ont à faire avec le matériel que le bloc est composé de, ainsi que certains attributs sur la façon dont le matériau est mis en place (feuilleté). Quand une nouvelle propriété du matériau est ajouté ou modifié une propriété existante, la boîte de dialogue propriété de bloc illustré à la figure III.8 apparaît.

Comme Point et les propriétés des limites, la première étape est de choisir un nom descriptif pour le matériel qui est décrit. Entrez dans la zone Nom de au lieu de " New Material".

The image shows a screenshot of the 'Block Property' dialog box. The 'Name' field contains 'New Material'. The 'B-H Curve' dropdown menu is set to 'Linear B-H Relationship'. Under the 'Linear Material Properties' section, there are four input fields: 'Relative μ_x ' (1), 'Relative μ_y ' (1), ' ϕ_{hx} , deg' (0), and ' ϕ_{hy} , deg' (0). The 'Nonlinear Material Properties' section includes an 'Edit B-H Curve' button and ' ϕ_{hmax} , deg' (0). The 'Coercivity' section has ' H_c , A/m' (0). The 'Electrical Conductivity' section has ' σ , MS/m' (0). The 'Source Current Density' section has ' J , MA/m²' (0). The 'Special Attributes: Lamination & Wire Type' dropdown is set to 'Not laminated or stranded'. Below this, there are four more input fields: 'Lam thickness, mm' (0), 'Lam fill factor' (1), 'Number of strands' (0), and 'Strand dia, mm' (0). At the bottom right are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figure III.8 boîte de dialogue propriété de bloc.

Suivant décider si le matériel aura un linéaire ou courbe de B-H non linéaire en sélectionnant l'entrée appropriée dans la liste déroulante de la courbe B-H.

La prochaine entrée dans la boîte de dialogue est H_c . Si le matériau est un aimant permanent, vous devez saisir la force coercitive de l'aimant, en unités d'ampères par mètre. Il ya quelques subtilités

dans la définition des propriétés d'aimants permanents (aimants permanents en particulier non linéaires).

L'entrée suivante représente J, la source densité de courant dans le bloc. La "densité de courant de la source" désigne le courant dans le bloc à courant continu. À des fréquences autres que DC dans une région avec une conductivité non nulle, les courants de Foucault sont induits qui change la densité de courant totale de sorte qu'il n'est plus égal à la densité de courante source. Utilisez "propriétés du circuit" d'imposer une valeur pour le courant total transporté dans une région où les courants de Foucault. Source densité de courant peut être à valeur complexe, si cela est souhaité.

La boîte d'édition de σ désigne la conductivité électrique du matériau dans le bloc. Cette valeur est généralement utilisée dans les problèmes (courants de Foucault) temps-harmonique. Les unités de conductivité sont 10^6 Siemens/Mètre (équivalent à $10^6(\Omega \cdot \text{mètres})^{-1}$). Pour référence, le cuivre à la température ambiante a une conductivité de 58 MS / m; un bon acier au silicium pour tôles à moteur peut avoir une conductivité d'aussi peu que 2 MS / m. Marchandises de qualité tôles de transformateurs sont plus comme 9 MS / m. Il faut noter que la conductivité a généralement une forte dépendance de la température, donc vous devez choisir vos valeurs de conductivité en gardant à l'esprit cette mise en garde.

Le dernier ensemble de propriétés est la stratification et la section Type de fil. Si le matériau est laminé, la liste déroulante de cette section est utilisée pour indiquer la direction dans laquelle le matériau est laminé. Si le matériau est destiné à représenter un nombre de bobine enroulée, cette liste déroulante spécifie le type de fil à partir de laquelle la bobine est construite.

III.5.10. Materials Library \ Matériels bibliothèque

Depuis un type de matériau pourrait être nécessaire dans plusieurs modèles différents, FEMM à une bibliothèque intégrée de définitions de bloc de propriété. L'utilisateur peut accéder et maintenir cette bibliothèque à travers les Propriétés | sélection des matériaux Bibliothèque hors du menu principal. Lorsque cette option est sélectionnée, la boîte de dialogue Matériaux Bibliothèque représenté dans la figure III.9 apparaît. Cette boîte de dialogue permet à l'utilisateur d'échanger des définitions de bloc de propriété entre le modèle actuel et la bibliothèque de matériaux via une interface drag-and-drop.

Un certain nombre de différentes options sont disponibles via un bouton droit de la souris cliquez lorsque le curseur se trouve au-dessus d'un dossier ou matériel. Les matériaux peuvent être modifiés en double-cliquant sur le matériau désiré.

Matériel provenant d'autres bibliothèques de matériaux ou modèles peuvent être importés en sélectionnant l'option «Importer des Matériaux» dans le menu du bouton droit qui apparaît lorsque le pointeur se trouve sur le dossier de niveau racine soit la Bibliothèque ou du modèle des listes de matériaux.

La bibliothèque de matériaux doit être située dans le même répertoire que les fichiers exécutables FEMM, sous le nom de fichier mlibrary.dat. Si vous déplacez la bibliothèque de matériaux, FEMM ne sera pas capable de le trouver.

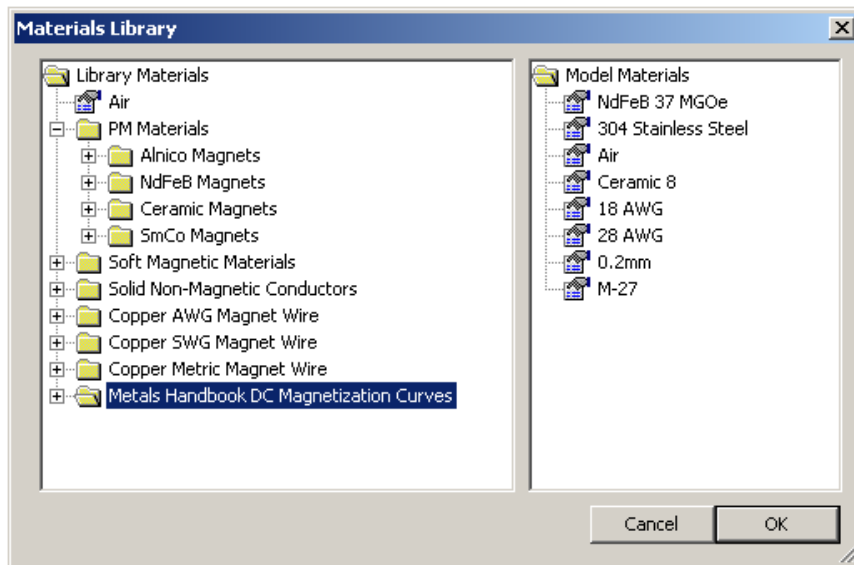


Figure III.9 Boîte de dialogue Matériels bibliothèque

III.5.11. Circuit Properties \ Propriétés de circuits

Le but des propriétés du circuit est de permettre à l'utilisateur d'appliquer des contraintes sur le courant circulant dans un ou plusieurs blocs. Les circuits peuvent être définis comme «parallèle» ou «série» connecté.

Si "parallèle" est sélectionné, le courant est réparti entre toutes les régions marquées avec cette propriété de circuit sur la base de l'impédance (courant est divisé de telle sorte que la chute de tension est la même dans toutes les sections connectées en parallèle). Seuls les conducteurs solides peuvent être connectés en parallèle.

Si "série" est sélectionné, le courant spécifié est appliqué à chaque bloc marqué avec cette propriété de circuit. En outre, les blocs qui sont marqués avec une propriété de circuit en série peuvent également être affectés d'un certain nombre de tours, de telle sorte que la région est considérée comme un conducteur toronné dans lequel le courant total est le circuit en série l'époque actuelle, le nombre de spires dans la région. Le nombre de tours pour une région est prescrit comme une propriété d'étiquette de bloc pour la région d'intérêt. Toutes les bobines échouées doivent être définies comme connectés en série (parce que chaque tour est connecté avec les autres spires en

série). A noter que le nombre de tours affecté à une étiquette de bloc peut être soit positive, soit un nombre négatif. Le signe du nombre de tours indique la direction d'écoulement de courant associée à un circuit de courant d'une valeur positive.

Pour les problèmes magnétostatiques, on pourrait aussi demander une densité de courant de la source sur le conducteur d'intérêt et obtenir des résultats similaires. Pour les problèmes courants de Foucault, cependant, les propriétés de « circuits » sont beaucoup plus utiles, ils permettent à l'utilisateur de définir le courant directement, et ils permettent à l'utilisateur d'attribuer une connectivité particulière dans les diverses régions de la géométrie. Cette information est utilisée pour obtenir l'impédance, liaison de flux, etc., d'une manière relativement indolore dans le post processeur. En appliquant propriétés du circuit, on peut aussi appliquer la connectivité dans les problèmes courants de Foucault.

La boîte de dialogue pour entrer propriétés du circuit est représenté dans la figure III.10.

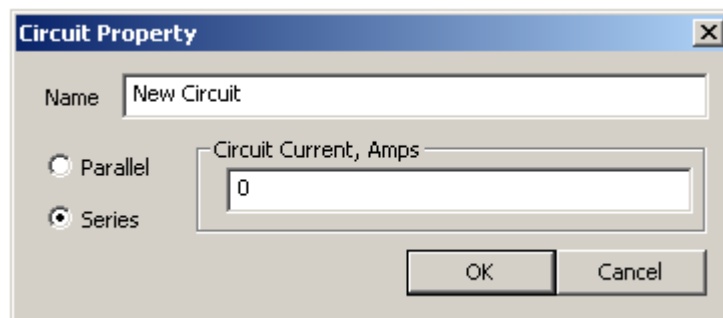


Figure III.10 Circuit de dialogue Propriété.

III.5.12. Analysis Tasks \ Tâches d'analyse

Maillage du modèle, l'analyse du modèle, et de visualiser les résultats sont le plus facilement effectuée par les boutons de la barre d'outils représentés dans la figure III.11.



Figure III.11 boutons de la barre d'outils pour le démarrage des tâches d'analyse.

Le premier de ces boutons (avec l'icône "maille jaune") exécute le générateur de maillage. Le solveur fait appelle automatiquement le générateur de maillage pour s'assurer que le maillage est à jour, de sorte que vous ne jamais avoir à appeler le mailleur de l'intérieur **femm**. Cependant, il est presque toujours important d'avoir un regard sur la maille et de voir qu'il "ressemble à droite." Lorsque le bouton de génération de maillage est enfoncé, le mailleur est appelé. Alors que le mailleur est en cours d'exécution, une entrée intitulée "triangle" apparaîtra sur la barre des tâches de Windows. Après la géométrie est triangulé, le maillage d'éléments finis est chargé en mémoire et affichée en dessous des noeuds définis, des segments, et les étiquettes de bloc comme un ensemble de lignes jaunes.

Si vous avez un très grand modèle, juste garder toutes les informations maillage dans le noyau peut prendre jusqu'à une quantité importante de mémoire. Si vous êtes sur le point de l'analyse d'un très grand problème, il pourrait être une bonne idée de choisir la maille | option de purge **Mesh** hors du menu principal. Lorsque cette option est choisie, la maille est supprimée de la mémoire, et la mémoire qu'elle occupe est libérée pour d'autres utilisations.

Le second bouton, avec l'icône " manivelle ", exécute le solveur, **fkern.exe**. Avant **fkern** est effectivement exécuté, le triangle est appelé pour s'assurer que le maillage est à jour. Ensuite, **fkern** est appelé. Lors de l'exécution **fkern**, il ouvre une fenêtre de console pour afficher des informations d'état à l'utilisateur. Comment jamais, **fkern** ne nécessite aucune interaction de l'utilisateur en cours d'exécution. Lorsque **fkern** est terminée l'analyse de votre problème, la fenêtre de la console va disparaître. Le temps que nécessite **fkern** est fortement dépendant du problème à résoudre. Fois de la solution peut varier de moins d'une seconde à plusieurs heures, en fonction de la taille et de la complexité du problème. En général, les problèmes magnétostatiques linéaires prennent le moins de temps. Problèmes harmoniques prennent un peu plus de temps, parce que la réponse est en termes de nombres complexes. Les nombres complexes doubler efficacement le nombre d'inconnues, par rapport à un problème magnétostatique avec la même maille. Les problèmes les plus lents à analyser des problèmes de temps harmonique non linéaire, depuis plusieurs itérations d'approximation successives doivent être utilisés pour converger vers la solution finale. Cependant, des problèmes non linéaires presque jamais prendre plus de 10 itérations. Itérations ultérieures de problèmes non linéaires sont généralement sont assez rapide par rapport à la première itération ou deux parce que les itérations ultérieures peuvent être initialisés avec une solution approchée qui est très proche de la solution " réelle ".

III.6. Les méthodes numériques

Pour ceux d'entre vous intéressés par ce qui se passe dans les coulisses dans les solveurs, cette section se veut une brève description des méthodes et techniques utilisées par FEMM. Références sont citées le cas échéant.

Tous les éléments ont été obtenus en utilisant des formulations variationnelles (basé sur la minimisation de l'énergie, au lieu de Galerkin, moindres carrés résiduelle, et ainsi de suite). Explications de l'approche variationnelle pour 2-D des problèmes plans avec des éléments du triangle de premier ordre sont largement disponibles dans la littérature.

Le cas de révolution pour le magnétisme, cependant, est bizarrement moins bien traité. Hoole et Silvester promouvoir la résolution des problèmes de révolution en termes de potentiel de

vecteur modifié. L'avantage du potentiel vecteur modifié est que les expressions forme fermée pour chaque terme dans les matrices d'éléments peuvent être formés. Une première version de FEMM utilisé cette technique, mais il est observé pour donner erreurs relativement plus près de $r = 0$. Avec la formulation potentielle modifiée, il est également non négligeable pour calculer la densité de flux moyenne associée à chaque élément. Cependant, la formulation proposée par Henrotte donne une bonne performance proche de $r = 0$. FEMM utilise une formulation qui est très similaire à Henrotte pour les problèmes magnétiques à symétrie axiale.

III.7. CONCLUSIONS

Finite Element Method Magnetics (FEMM) est simple, précis et faible outil freeware de coût de calcul pour effectuer des simulations en électromagnétisme. Malgré sa popularité dans les sciences et l'ingénierie de sa valeur éducative a été sous-estimé. Dans ce chapitre, la capacité du FEMM se réunir en outil complémentaire aux besoins de l'électromagnétisme de l'enseignement dans l'enseignement supérieur a été explorées. Il le donne un bref aperçu de l'environnement logiciel.

Chapitre IV

INTRODUCTION

Les études faites sur la machine Pseudo direct drive PDD montre qu'elle offre plus de modes de fonctionnements et un couple volumique plus élevé. La machine Pseudo direct drive se compose d'un rotor interne et d'un rotor externe. Chaque rotor a une culasse ferromagnétique et un nombre différent des pôles d'aimants permanents. Le couple électromagnétique est produit par l'interaction des deux aimants de paire de pôles sur le rotor à grande vitesse avec les courants dans le bobinage du stator. La modélisation de la PDD montre que qu'elle nécessite un bagage important de calcul numérique et un couplage entre les équations électriques, magnétiques et mécaniques. L'utilisation des logiciels est primordiale pour un calcul énorme et précis tel que les logiciels commerciaux : Flux2D, ANSYS, MAXWELL etc ... Ces logiciels nécessitent des stations énormes et coûteuses. La disponibilité de ces logiciels et de ces stations de calcul n'est pas toujours abordable ou accessible. Pour contourner ce problème, nous nous sommes dirigés vers l'utilisation d'un logiciel de calcul libre, tel que le FEMM dont on va utiliser ses performances pour expliquer le mode de fonctionnement de la PDD.

Le dispositif étudié est montré dans la figure IV.1 et le dispositif explosé est montré dans la figure. IV.2. L'étude de la machine PDD nécessite un calcul en régime transitoire qui peut prendre des heures de calcul prohibitives. Pour alléger ce calcul en vue d'une étude simple expliquant uniquement le mode de fonctionnement, nous avons abordé le sujet en passant par les étapes suivantes :

- 1^{er} étape : Etude la machine PDD sans rotor externe et les aimants statoriques (étude le rotor interne).
- 2^{eme} étape : étude la machine PDD sans les aimants statorique (étude le rotor interne avec le rotor externe).
- 3^{eme} étape : étude la machine PDD sans les aimants statorique (étude le rotor interne avec le rotor externe).

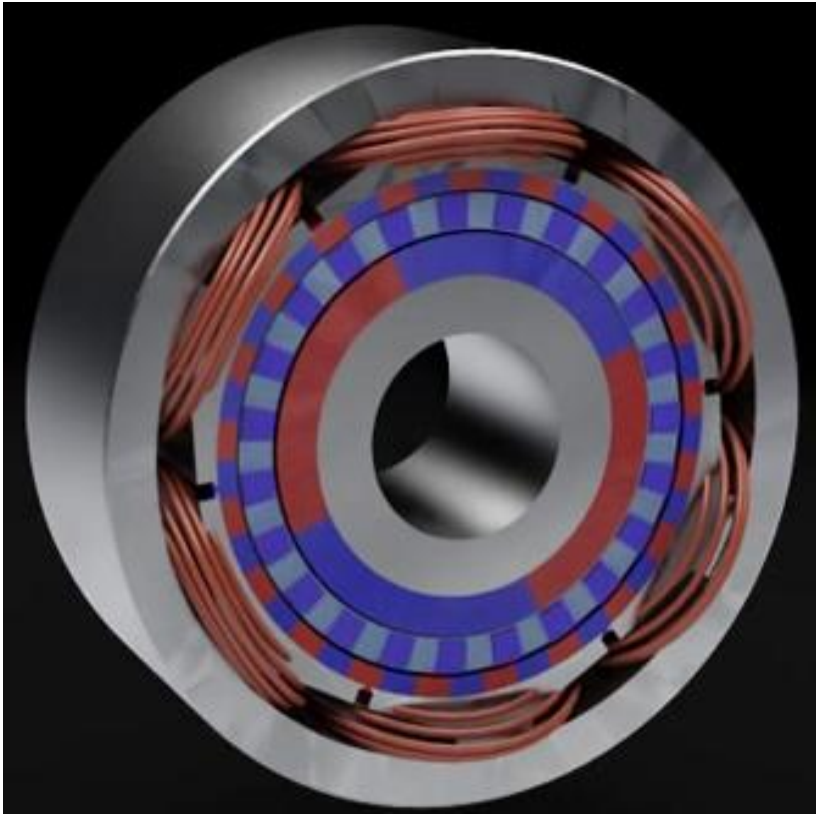


Figure. IV.1 Dispositif étudié

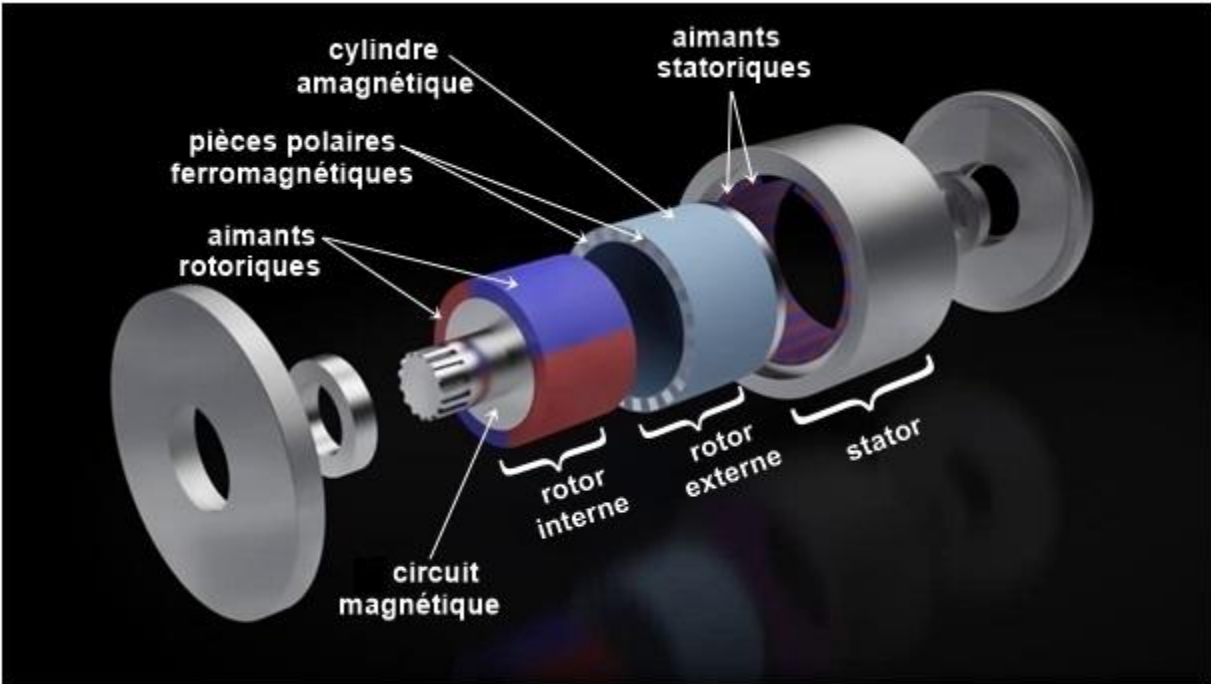


Figure. IV.2 Dispositif étudié en détail sans le bobinage statorique.

1^{er} étape : Etude la machine PDD sans rotor externe et les aimants statoriques

Dans cette étape de calcul où on considère uniquement le rotor interne contenant le circuit magnétique rotorique et les deux paires de pôles d'aimants permanents ; et le stator contenant le circuit magnétique et le bobinage statorique triphasé (Figure. IV.3.). Pour plus commodité et de clarté, nous avons modélisé le bobinage statorique par la manière indiquée sur la Figure. IV.4 qui donnerait un champ statorique équivalent. La figure. IV.5, montre le maillage éléments finis de la PDD à la position initiale où l'angle θ_s entre le champ statorique dirigé du rotor vers le stator et l'axe des x est égal à 35° . L'angle θ_r entre le champ rotorique de l'aimant M_{sn} et l'axe des x est égal à 45° . Ainsi l'angle θ entre le champ statorique et le champ rotorique est égale à 10° . La figure. IV.6. montre les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale.

On définit :

- M_{sn} est l'aimant non coloré tel que son aimantation M est dirigée du rotor vers le stator.
- M_{ns} est l'aimant coloré tel que son aimantation M est dirigée du stator vers le rotor.

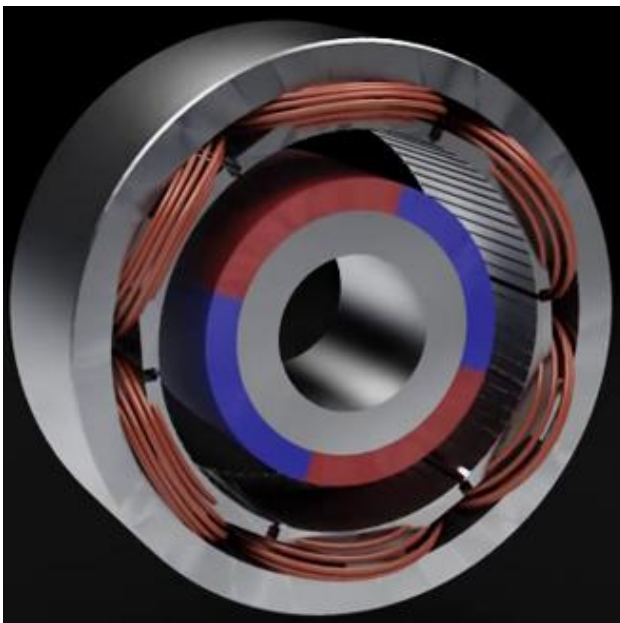


Figure. IV.3. Dispositif étudié de la 1^{ère} étape

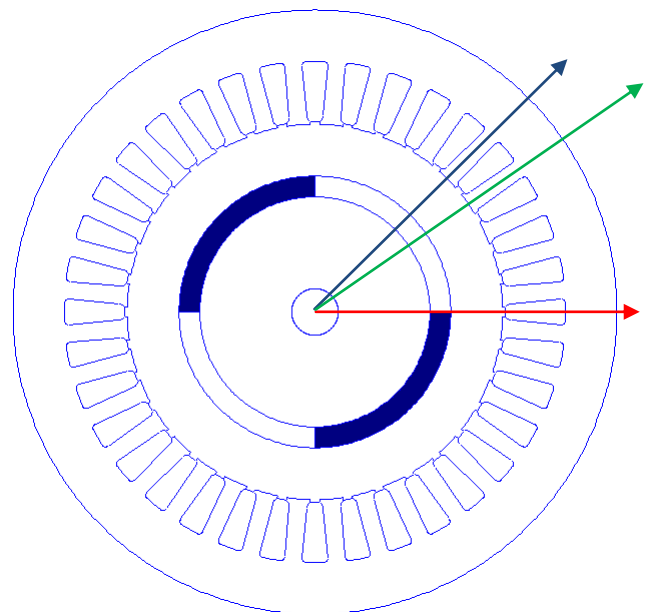


Figure. IV.4. Géométrie modélisée de la 1^{ère} étape

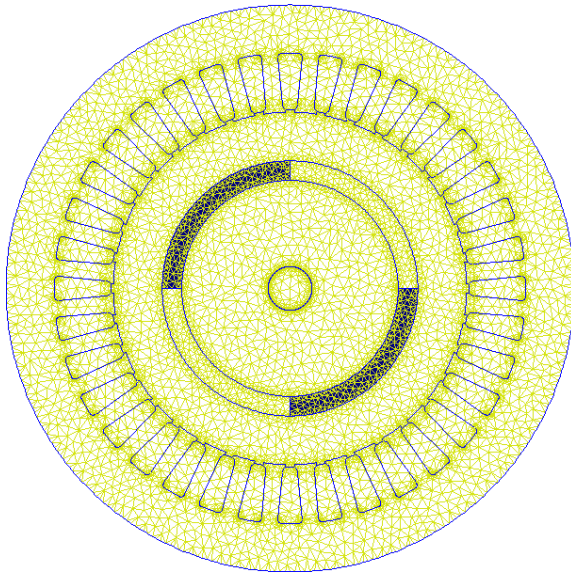


Figure. IV.5. le maillage en la position initiale

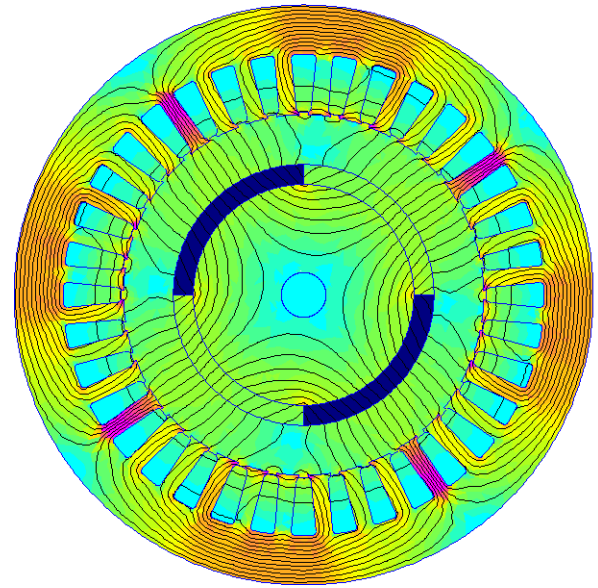


Figure. IV.6. les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale

Req :

→ Direction de chams statorique

→ Direction de chams rotorique

→ Le repaire xx.

Par la suite on fait tourner le rotor interne d'un tour complet avec un pas de 2° tout on laisse la disposition statorique la même et ont relève le couple. La figure. IV.7. montre le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de la position (l'angle θ) à partir de position initiale.

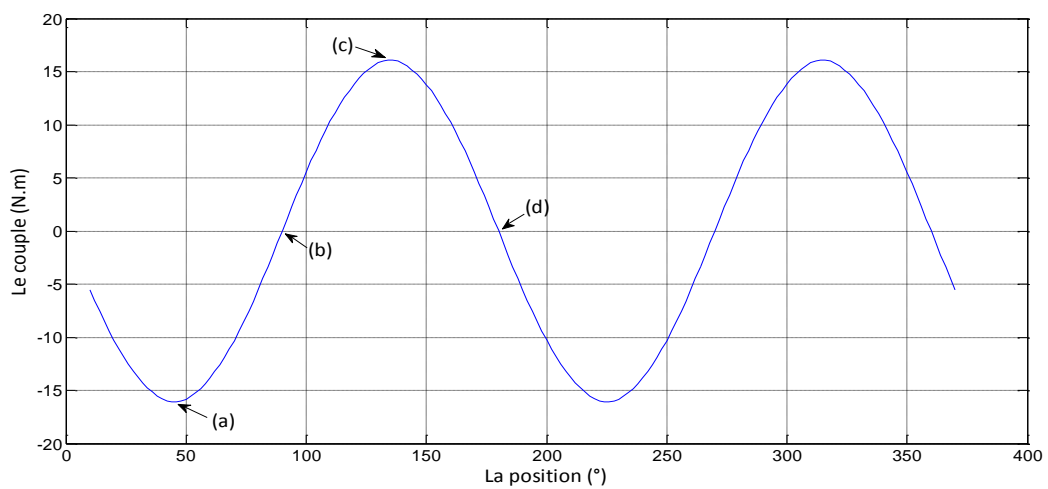


Figure. IV.7. le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de la position.

On illustre sur les figures qui suivent l'induction du champ magnétique pour les positions où le couple est maximum négative, nul, maximum positif et nul.

- (a) : la position $\theta = 45^\circ$: couple est maximum négatif.
- (b) : la position $\theta = 90^\circ$: couple est nul.
- (c) : la position $\theta = 135^\circ$: couple est maximum positif.
- (d) : la position $\theta = 180^\circ$: couple est devenue nul.

a) Position $\theta = 45^\circ$: couple est maximum négatif.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.7, on remarque que le couple est maximum négatif pour θ égale à 45° donc la position du rotor est de 80° par rapport à l'axe des x. La figure. IV.8. montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 45^\circ$ où le couple est maximum négatif. Cela donne une grande rotation dans le sens des aiguilles de la montre.

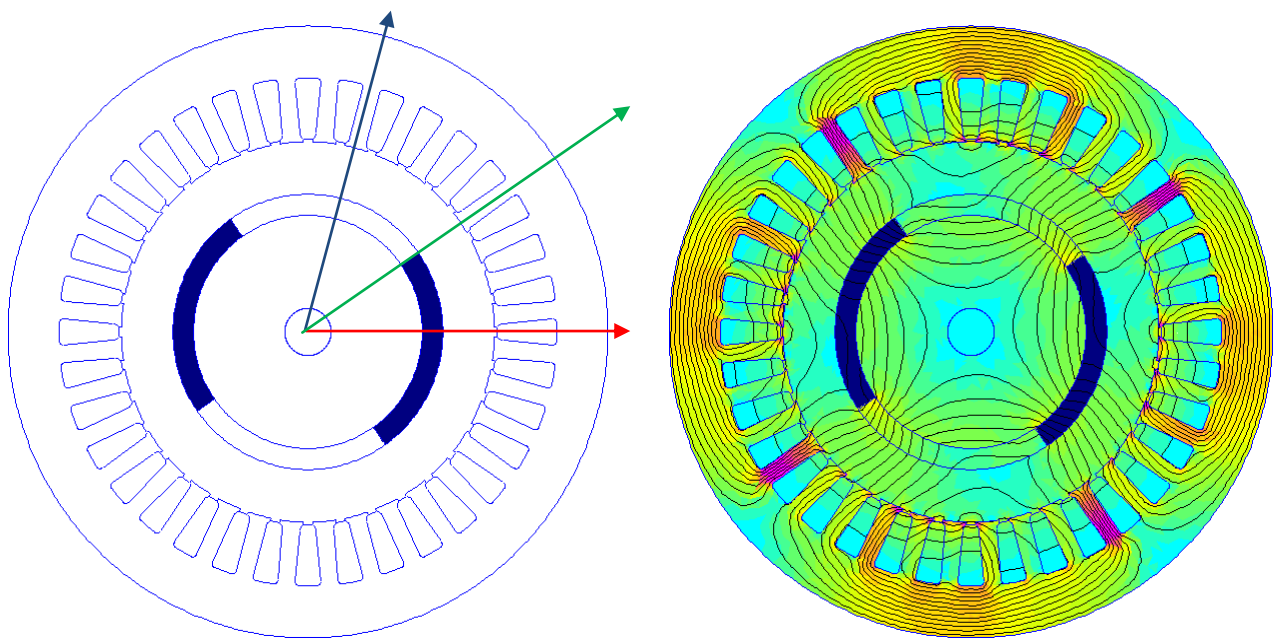


Figure. IV.8. Induction magnétique : position $\theta = 45^\circ$ et couple maximum négatif.

b) Position $\theta = 90^\circ$: couple est nul.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.7, on remarque que le couple est nul pour θ égale à 90° donc la position du rotor est de 125° par rapport à l'axe des x. La figure. IV.9. montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 90^\circ$ où le couple est maximum négatif. Cela donne une grande rotation dans le sens des aiguilles de la montre.

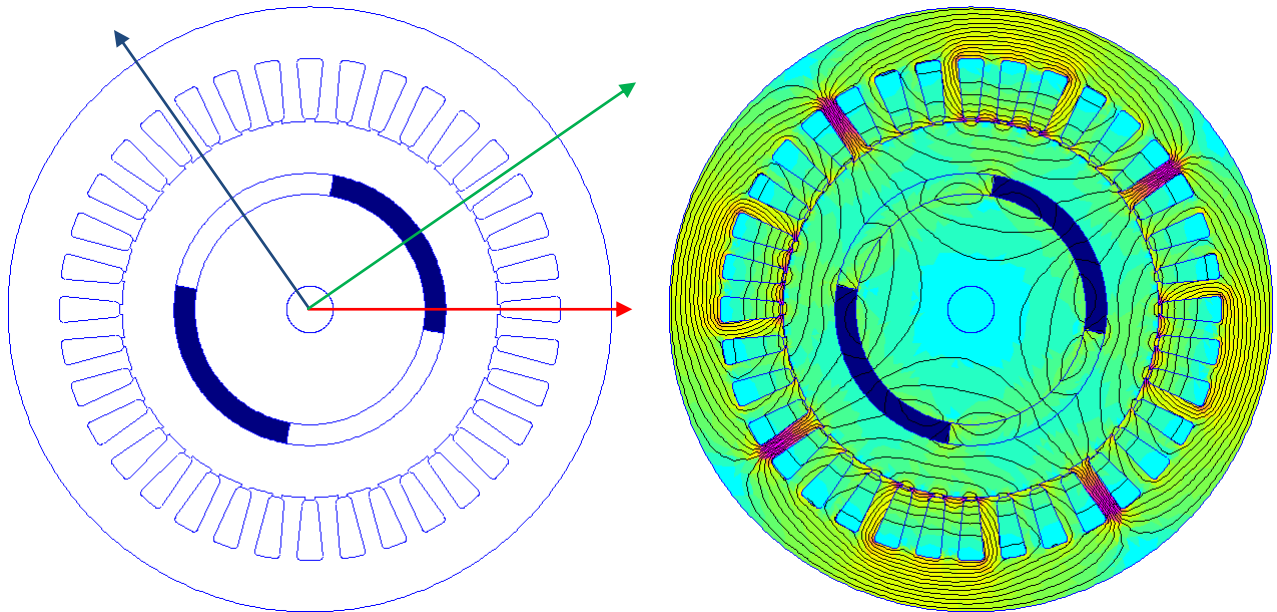


Figure. IV.9. Induction magnétique : position $\theta = 90^\circ$ et couple nul.

c) Position $\theta = 135^\circ$: couple est maximum positif.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.7, on remarque que le couple est maximum positif pour θ égale à 135° donc la position du rotor est de 170° par rapport à l'axe des x. La figure. IV.10. montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 135^\circ$ où le couple est maximum positif. Cela donne une grande rotation dans le sens contre des aiguilles de la montre.

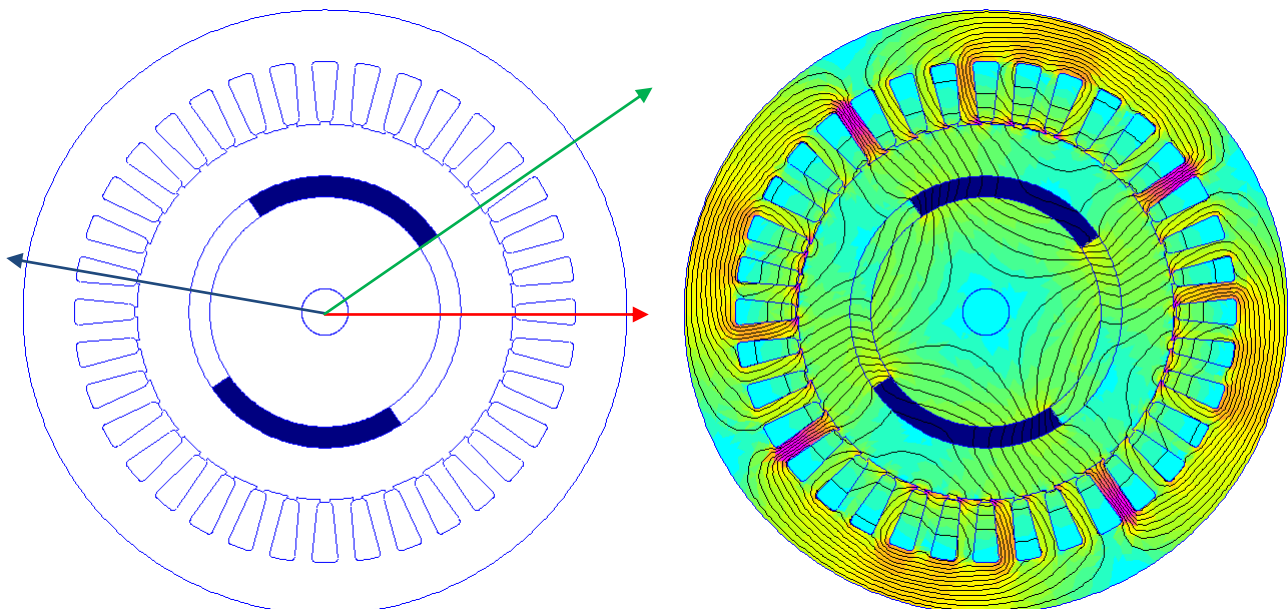


Figure. IV.10. Induction magnétique : position $\theta = 135^\circ$ et couple maximum positif.

d) Position $\theta = 180^\circ$: couple est devenue nul.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.7, on remarque que le couple est devenue nul pour θ égale à 180° donc la position du rotor est de 215° par rapport à l'axe des x. La Figure. IV.11. montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 180^\circ$ où le couple est devenue nul. Cela donne une rotation nulle.

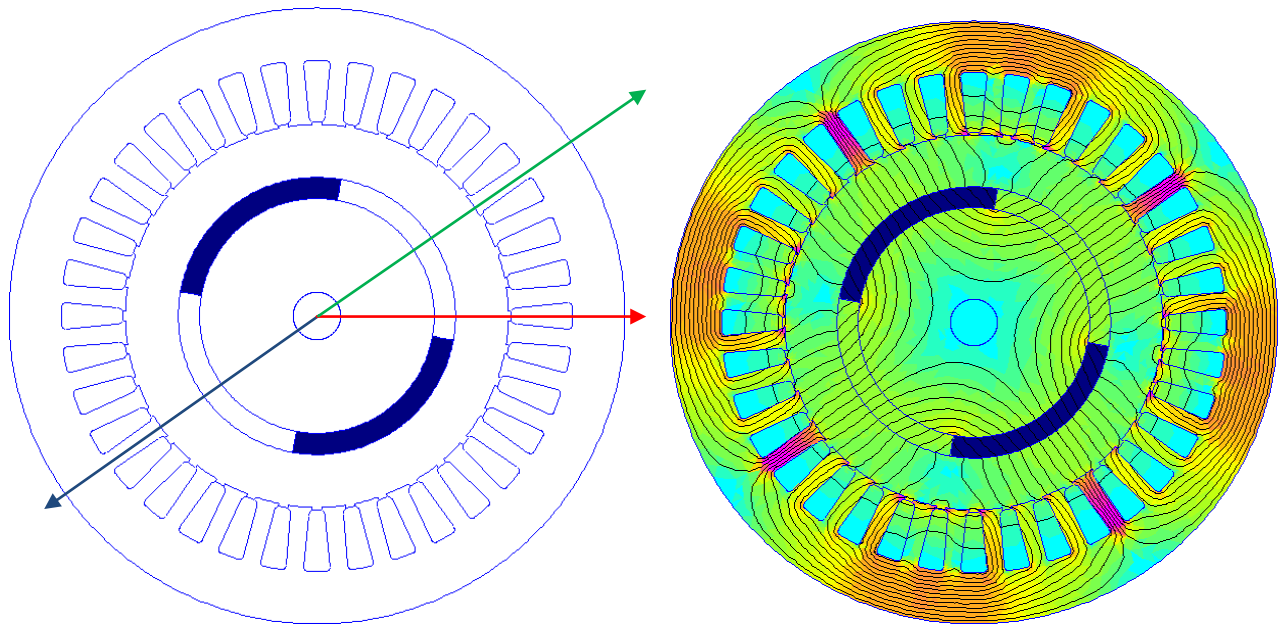


Figure. IV.11. Induction magnétique : position $\theta = 180^\circ$ et couple nul.

Cette étude nous montre que pour démarrer cette machine (c'est le cas aussi des machines à aimant permanent), il faut détecter la position du champ rotorique par rapport au champ statorique et qui doit être 45° pour un nombre de paire de pôles égale à deux pour avoir un couple maximum qui aurait la possibilité de faire tourner le rotor. Un faible couple entrainerait un disfonctionnement de la machine. Un couple négatif maximum fait tourner la machine dans le sens des aiguilles de montre. Pour la suite de cette étude, on garde la position où le couple est maximum positif.

2^{ème} étape : étude la machine PDD sans les aimants statorique (étude le rotor interne avec le rotor externe)

Dans cette étape on a rajouté le rotor externe composé de pièces ferromagnétiques et on a fixé le rotor interne à la position où le couple est maximum positif (la position (c)) (Figure. IV.13). La figure. IV.14, montre le maillage éléments finis de la PDD à la position initiale où l'angle θ_s entre le champ statorique dirigé du rotor vers le stator et l'axe des x est égal à 35° . L'angle θ_r entre le champ rotorique de l'aimant Msn et l'axe des x est égal à 170° . Ainsi l'angle θ entre le champ statorique et le champ rotorique est égale à 135° . La figure. IV.15. montre les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale

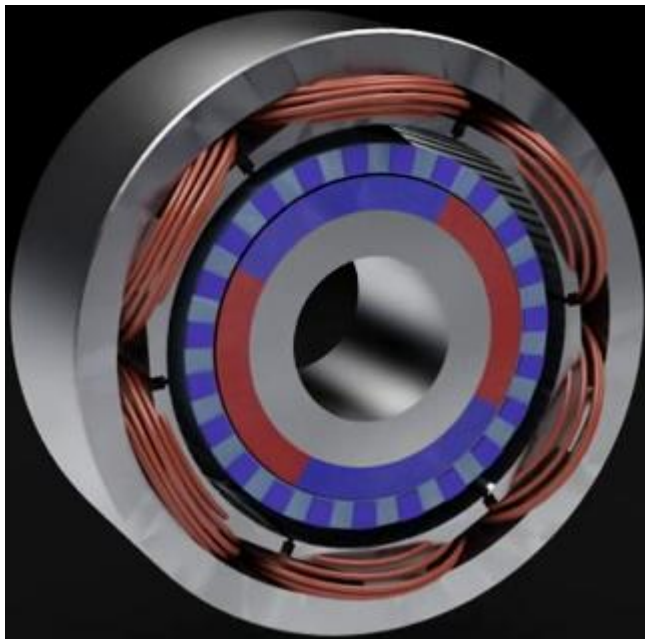


Figure. IV.12. Le dispositif étudié dans la 2^{ème} étape.

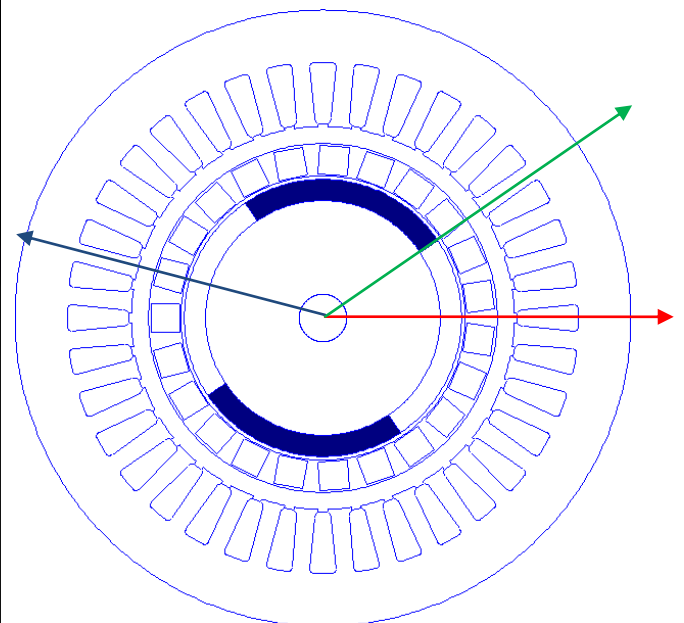


Figure. IV.13. la géométrie de la 2^{ème} étape.

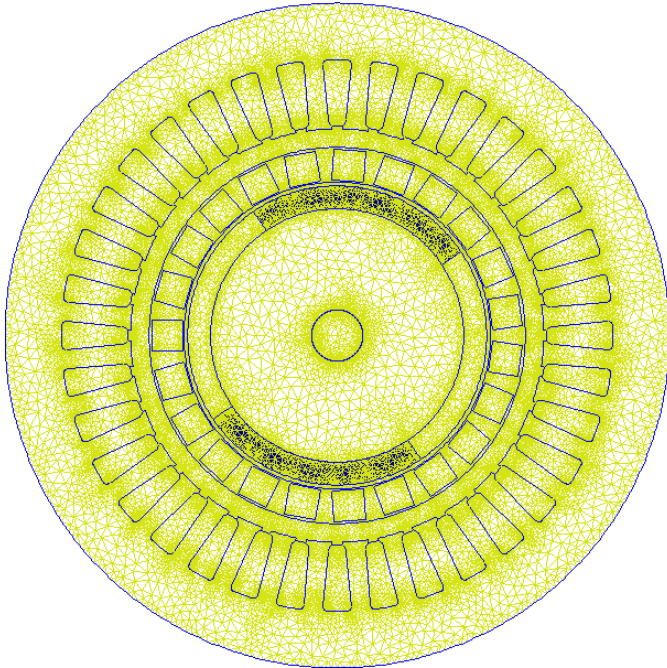


Figure. IV.14. le maillage du dispositif étudié

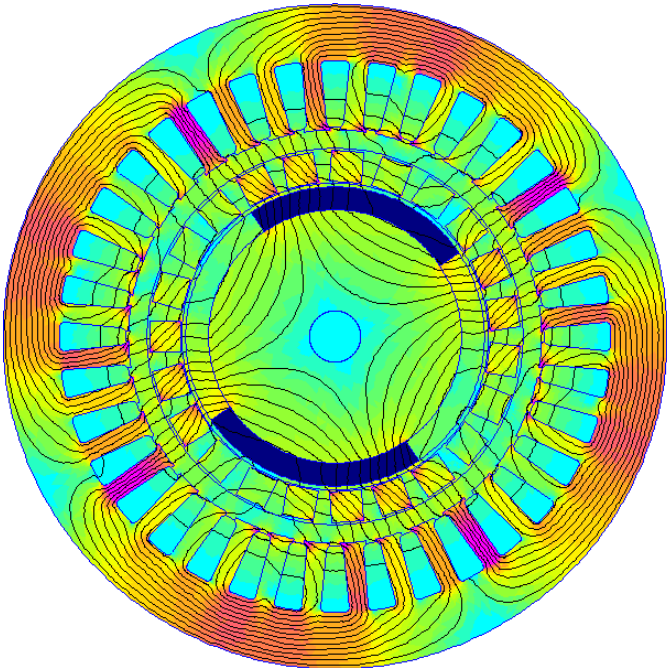


Figure. IV.15. Contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale de la 2^{ème} étape.

Par la suite on fait tourner le rotor externe d'un demi-tour avec un pas de 2° tout en laissant la disposition statorique la même et on relève le couple. La figure. IV.16. montre le couple appliqué sur le rotor externe en fonction de l'angle θ et la figure. IV.17. montre le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de l'angle θ à partir de position initiale.

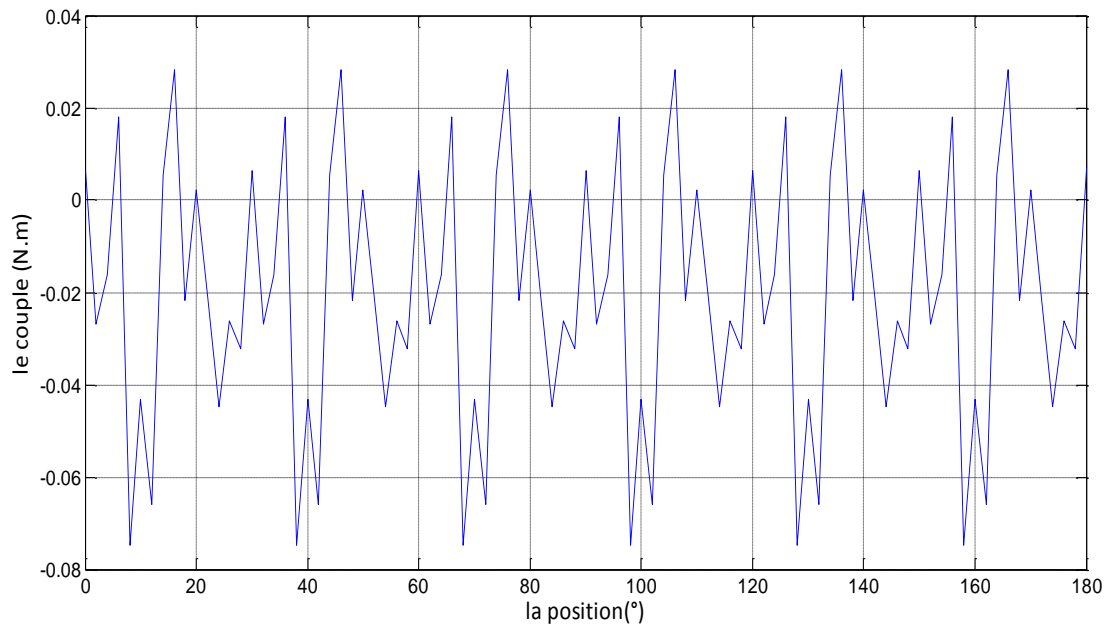


Figure. IV.16. le couple appliqué sur le rotor externe en fonction de la position.

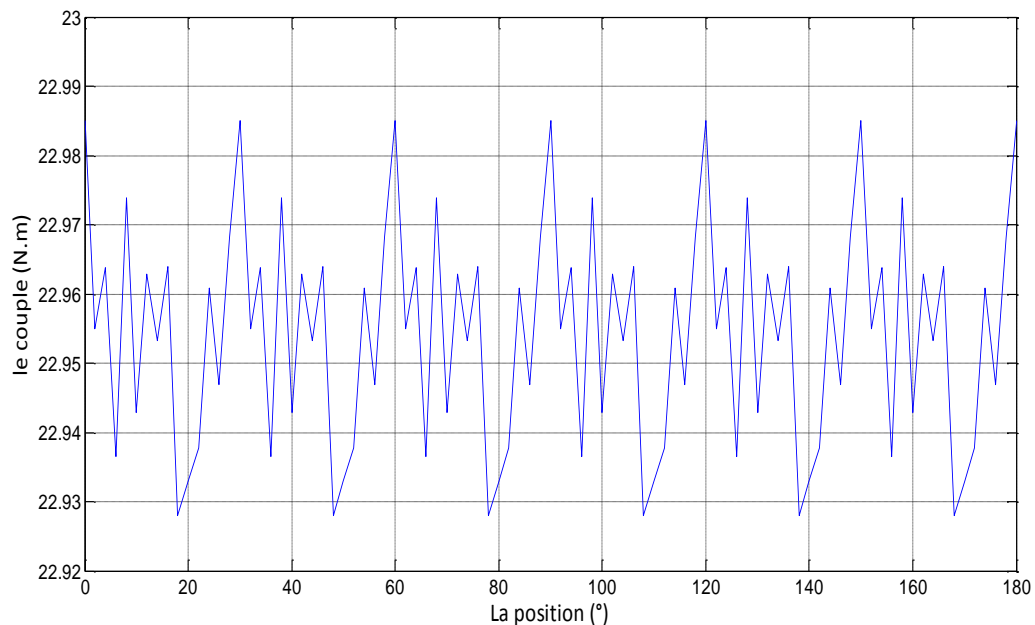


Figure. IV.17. le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de la position.

On remarque que le couple appliqué sur le rotor externe est très négligeable 0.05N.m par rapport au couple appliqué sur le rotor interne 23 N.m. Cela implique que ce couple ne permet pas une rotation du rotor externe. La figure. IV.18 et la figure. IV.19 montrent la comparaison entre les deux couples. On remarque aussi que le couple du rotor interne a augmenté de la valeur 16 N.m à la valeur 23 N.m. Cette augmentation est due à l'introduction des pièces ferromagnétiques qui réduisent l'entrefer et canalise les lignes de champ. En plus, nous pouvons dire que le rotor interne (ou d'une autre manière les aimants rotorique) n'a pas un effet sur le rotor externe dans cette étape uniquement. La Figure. IV.20 montre la différence entre le couple interne et externe. L'introduction des aimants statorique va permettre dans la troisième étape d'expliquer pourquoi le rotor externe commence à tourner.

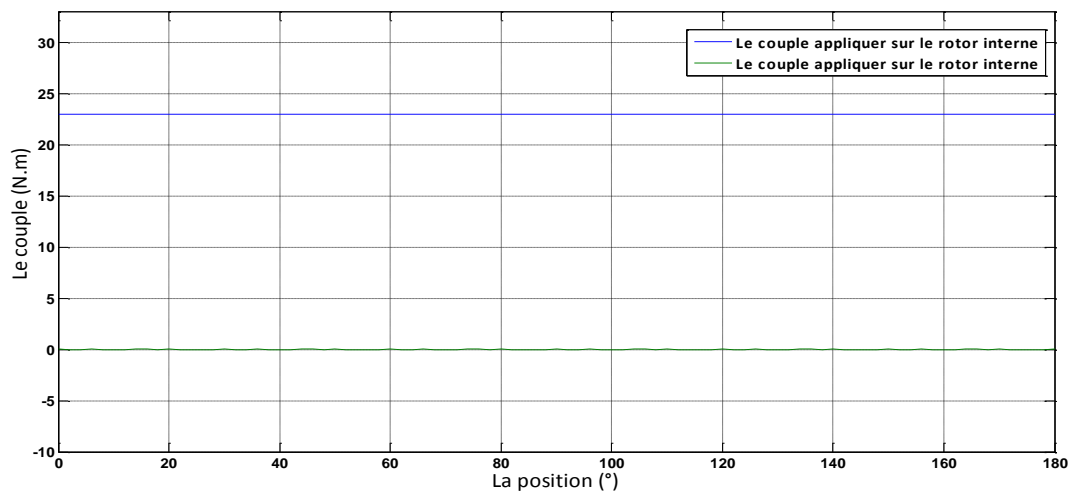


Figure. IV.18. (a) la comparaison entre les deux couples (interne et externe).

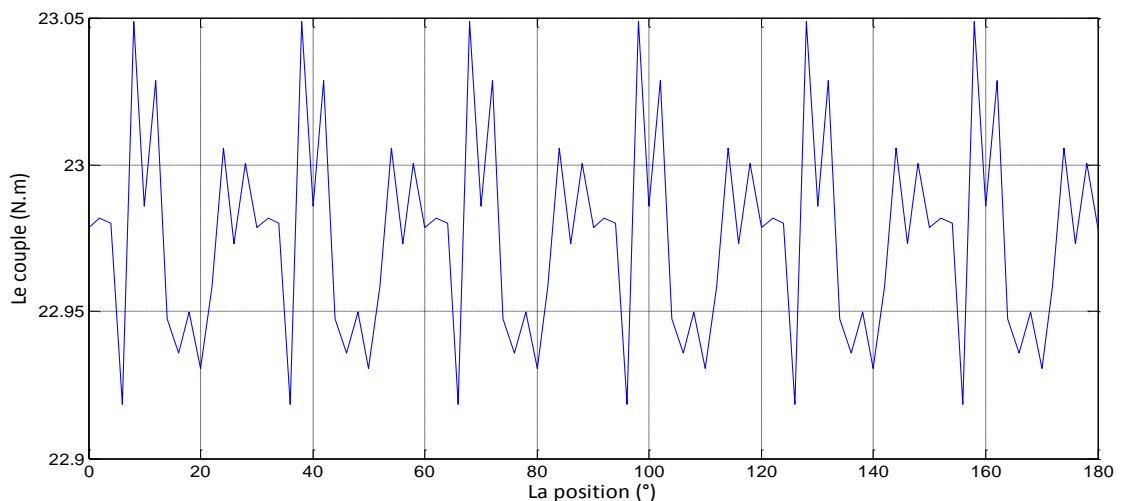


Figure. IV.18. (b) la comparaison entre les deux couples (interne et externe).

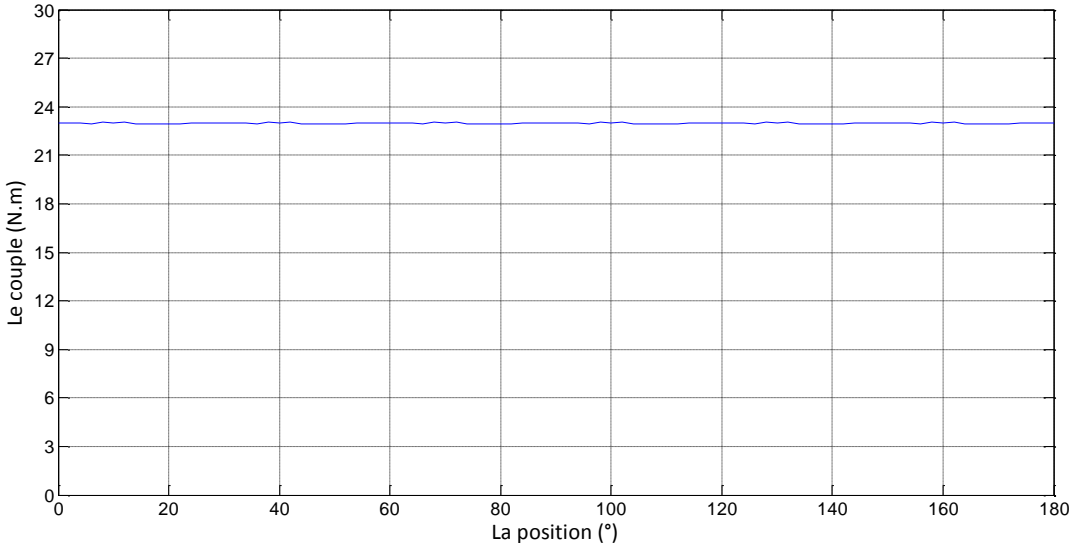


Figure. IV.20 la différence entre le couple interne et externe.

3^{ème} étape : étude de la machine PDD complète

Dans cette étape on a rajouté les aimants permanents statoriques qui sont de nombre de 21 paires de pôles. La disposition de ces aimants est montrée sur la figure. IV.21. On a fixé le rotor interne à la position où le couple est maximum positif (la position (c)) (Figure. IV.21). La figure. IV.22, montre le maillage éléments finis de la PDD à la position initiale où l'angle θ_s entre le champ statorique dirigé du rotor vers le stator et l'axe des x est égal à 35° . L'angle θ_r entre le champ rotorique de l'aimant M_{sn} et l'axe des x est égal à 170° . Ainsi l'angle θ entre le champ statorique et le champ rotorique est égale à 135° . La figure. IV.22. montre les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale.

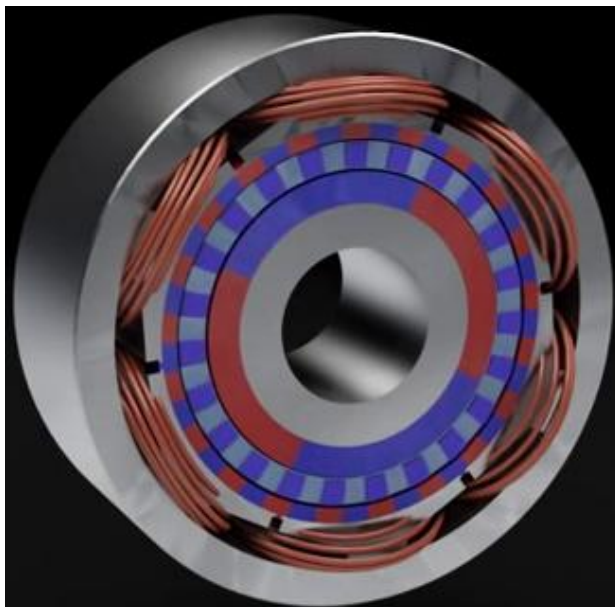


Figure. IV.20. Le dispositif étudié de la 3^{ème} étape (La machine PDD complète),

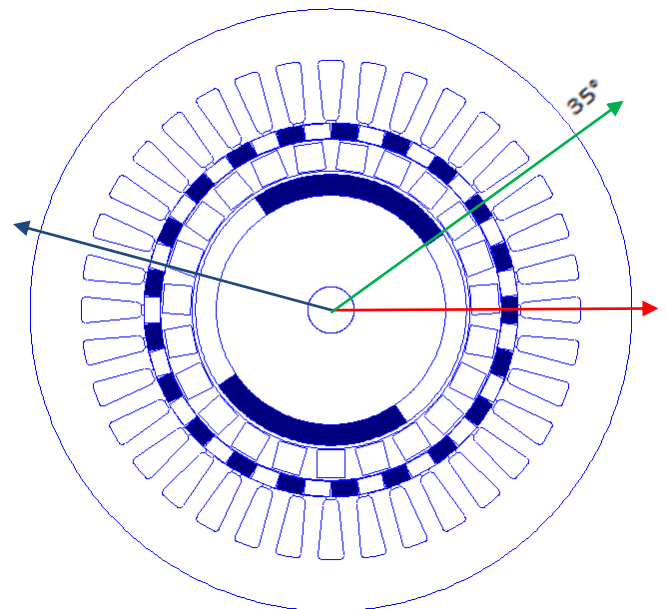


Figure. IV.21. la géométrie de la 3^{ème} étape.

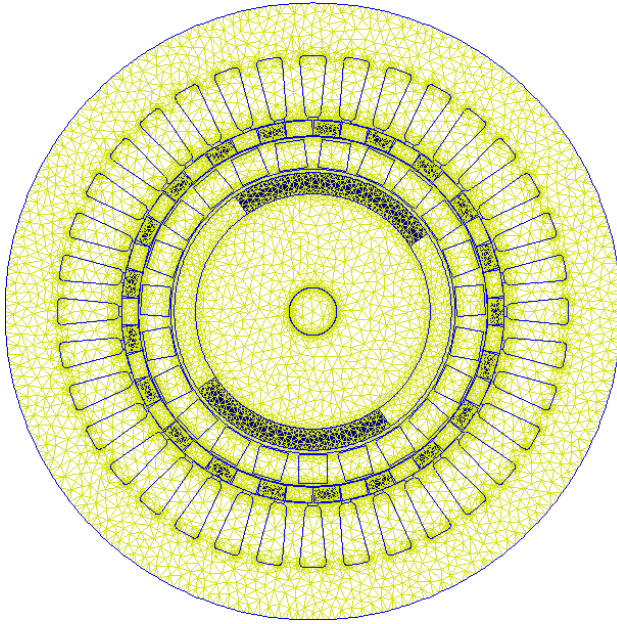


Figure. IV.22. le maillage du dispositif étudié

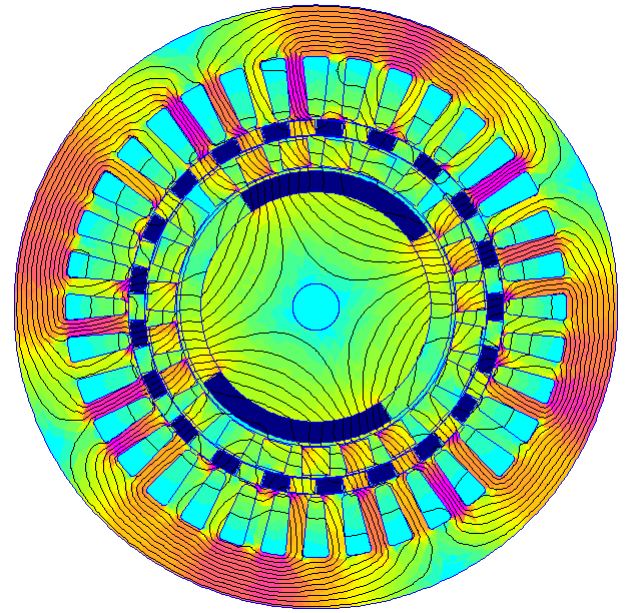


Figure. IV.23. les contours et les dégradés de l'induction magnétique à la position initiale

Par la suite on fait tourner le rotor externe d'un demi-tour avec un pas de 2° tout en laissant la disposition statorique la même et on relève le couple. La figure. IV.24. montre le couple appliqué sur le rotor externe en fonction de l'angle θ et la figure. IV.25 montre le couple appliqué sur le rotor interne en fonction de la position à partir de position initiale.

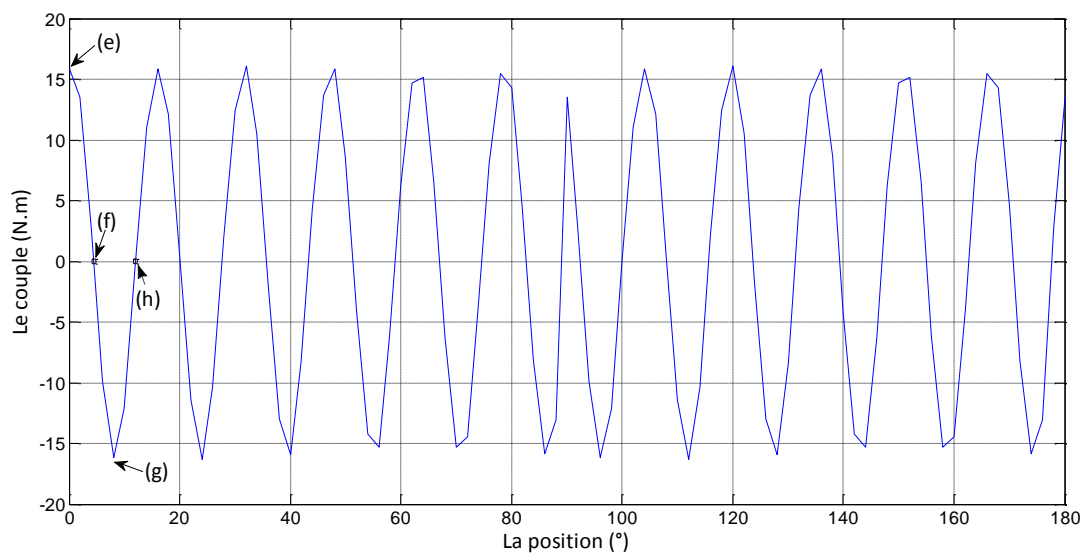


Figure. IV.24. le couple appliqué sur le rotor externe en fonction de la position.

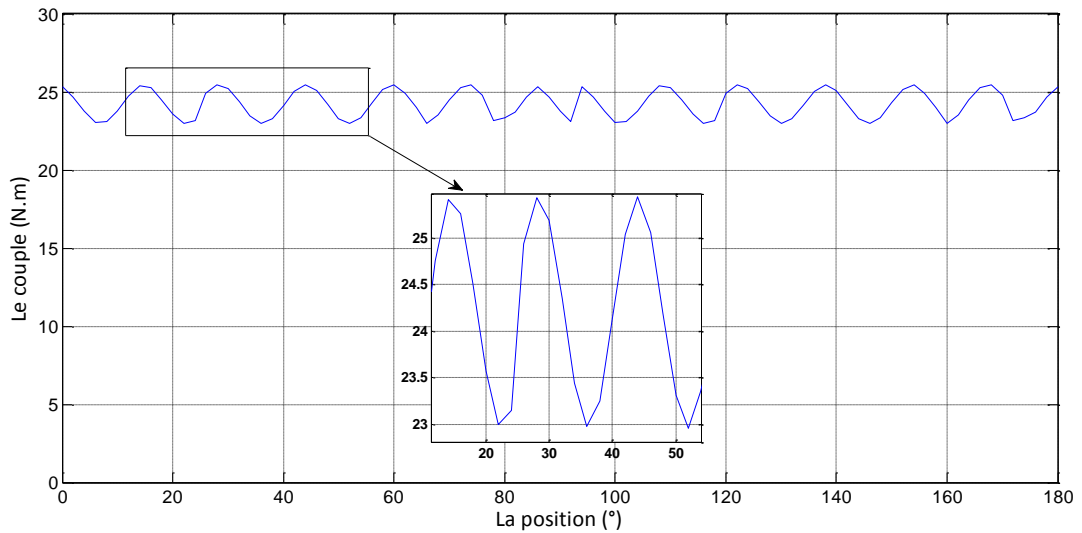


Figure. IV.25. le couple applique sur le rotor interne en fonction de la position.

On remarque que le couple appliqué sur le rotor externe est très négligeable par rapport au couple appliqué sur le rotor interne. La figure. IV.26 montrera la comparaison entre les deux couples. Cela implique que le couple appliqué au rotor externe ne permet pas une rotation du rotor externe. L'introduction des aimants statoriques va permettre dans la troisième étape d'expliquer pourquoi le rotor externe commence à tourner.

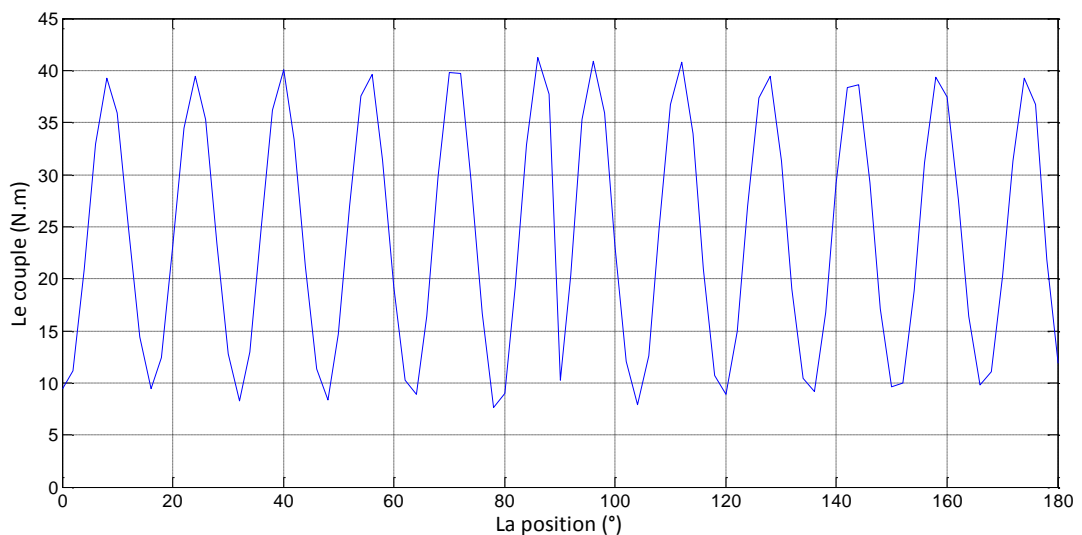


Figure. IV.26. la différence entre le couple interne et externe.

On illustre sur les figures qui suivent l'induction du champ magnétique pour les positions où le couple est maximum négatif, nul, maximum positif et devenue nul.

(e) : la position $\theta = 0^\circ$: couple est maximum positif.

(f) : la position $\theta = 4.45^\circ$: couple est nul.

(g) : la position $\theta = 8^\circ$: couple est maximum négatif.

(h) : la position $\theta = 12^\circ$: couple est devenue nul.

a) Position $\theta = 0^\circ$: couple est maximum positif.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.24, on remarque que le couple est maximum positif pour θ égale à 0° donc la position du rotor est de 170° par rapport à l'axe des x. La figure. IV.27. montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 0^\circ$ où le couple est maximum positif. Cela donne une grande rotation dans le sens contre des aiguilles de la montre.

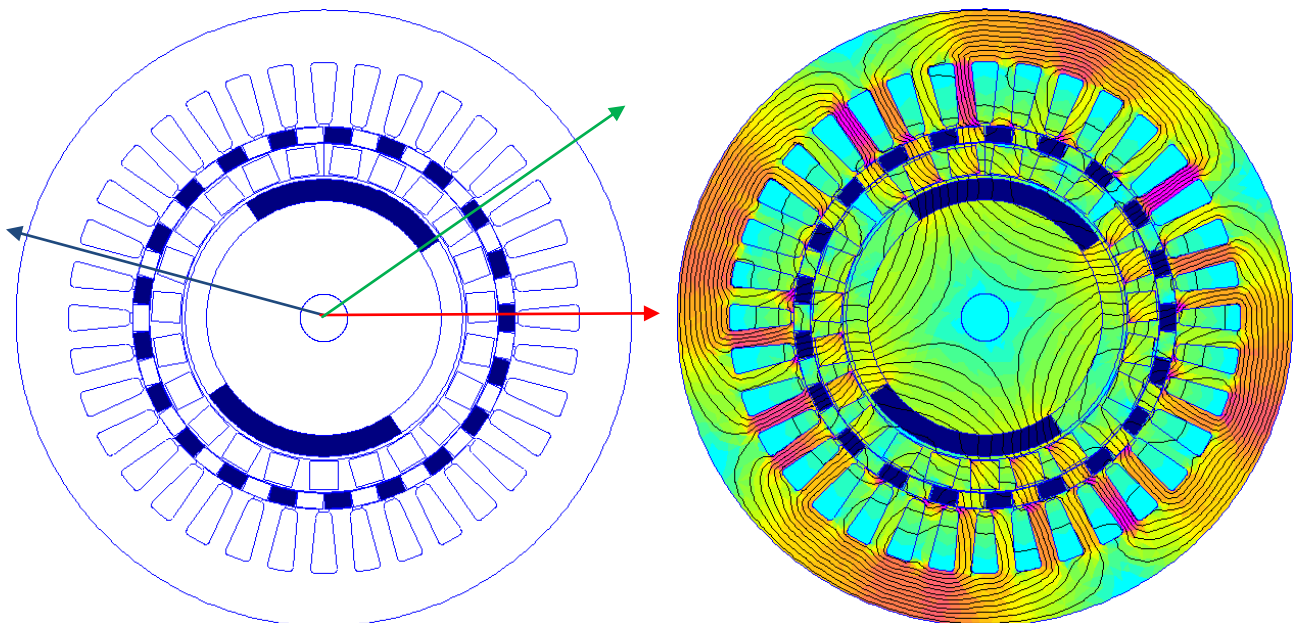


Figure. IV.27. Induction magnétique : position $\theta = 0^\circ$ et couple maximum positif.

b) Position $\theta = 4.45^\circ$: couple est nul.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.24, on remarque que le couple est maximum négatif pour θ égale à 4.45° . La Figure. IV.28 montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 4.45^\circ$ où le couple est maximum négatif. Cela donne une rotation nulle.

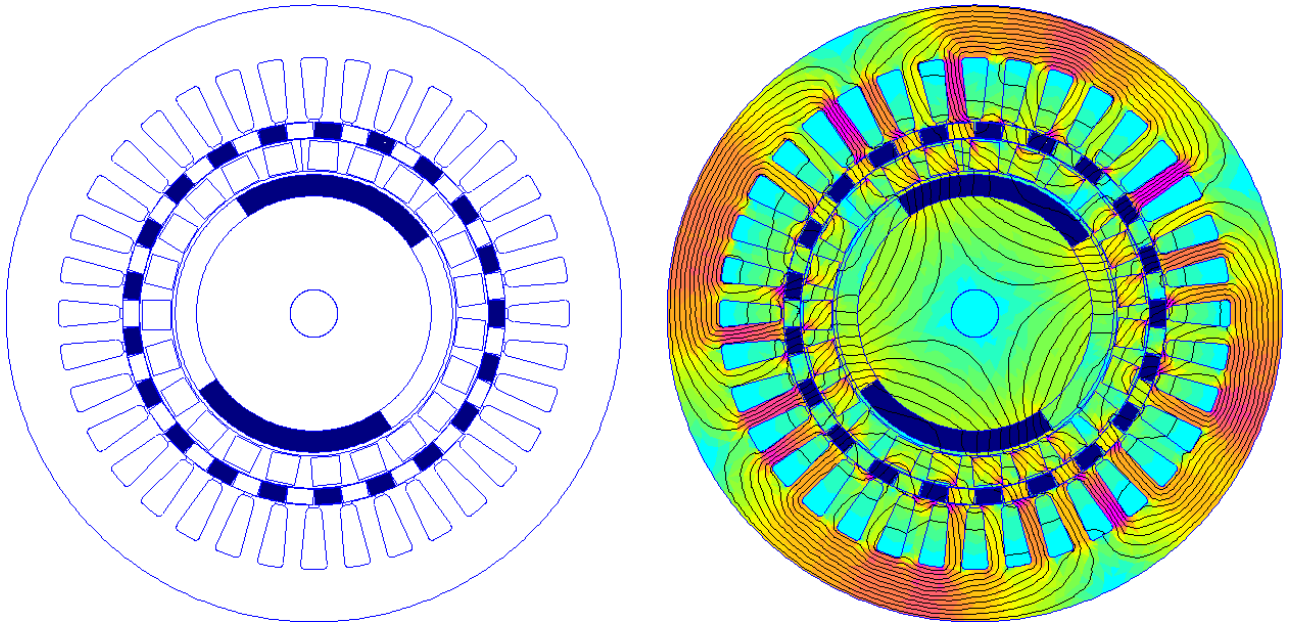


Figure. IV.28. Induction magnétique : position $\theta = 4.45^\circ$ et couple maximum négatif.

c) Position $\theta = 8^\circ$: couple est maximum négatif.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.24, on remarque que le couple est maximum négatif pour θ égale à 8° . La Figure. IV.29. montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 8^\circ$ où le couple est maximum négatif. Cela donne une grande rotation dans le sens des aiguilles de la montre.

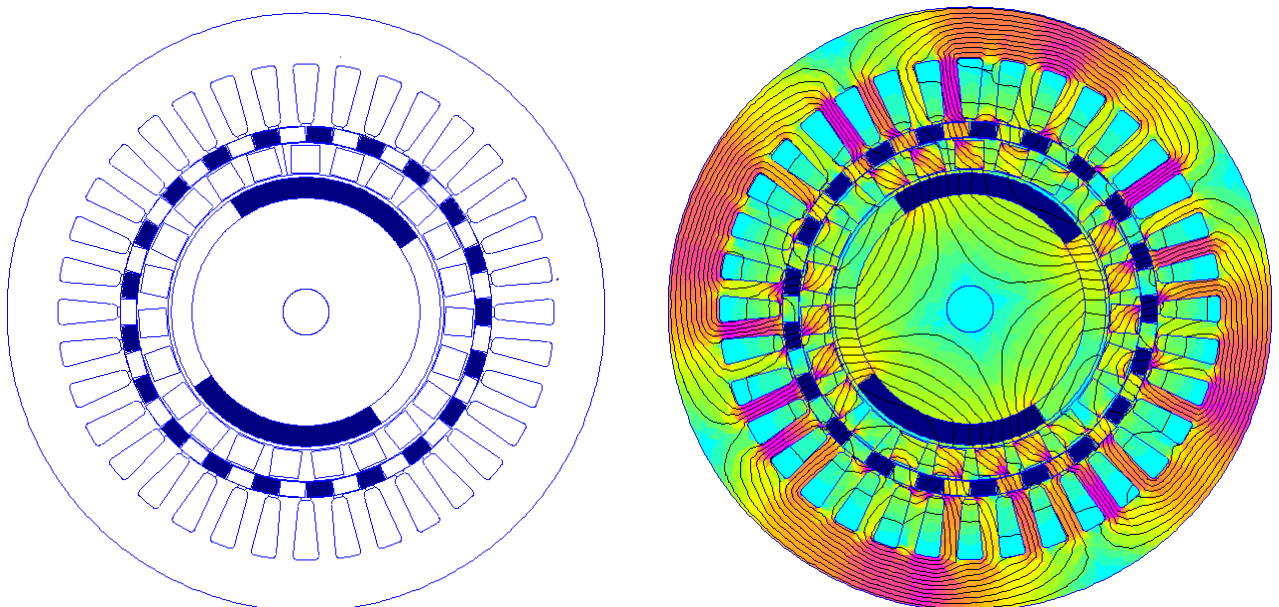


Figure. IV.29. Induction magnétique : position $\theta = 8^\circ$ et couple maximum négatif.

d) Position $\theta = 12^\circ$: couple est devenue nul.

A partir de la courbe représentée dans la figure. IV.24, on remarque que le couple est devenu nul pour θ égale à 12° . La figure. IV.30. montre l'induction magnétique pour la position $\theta = 12^\circ$ où le couple est devenue nul. Cela donne une rotation nulle.

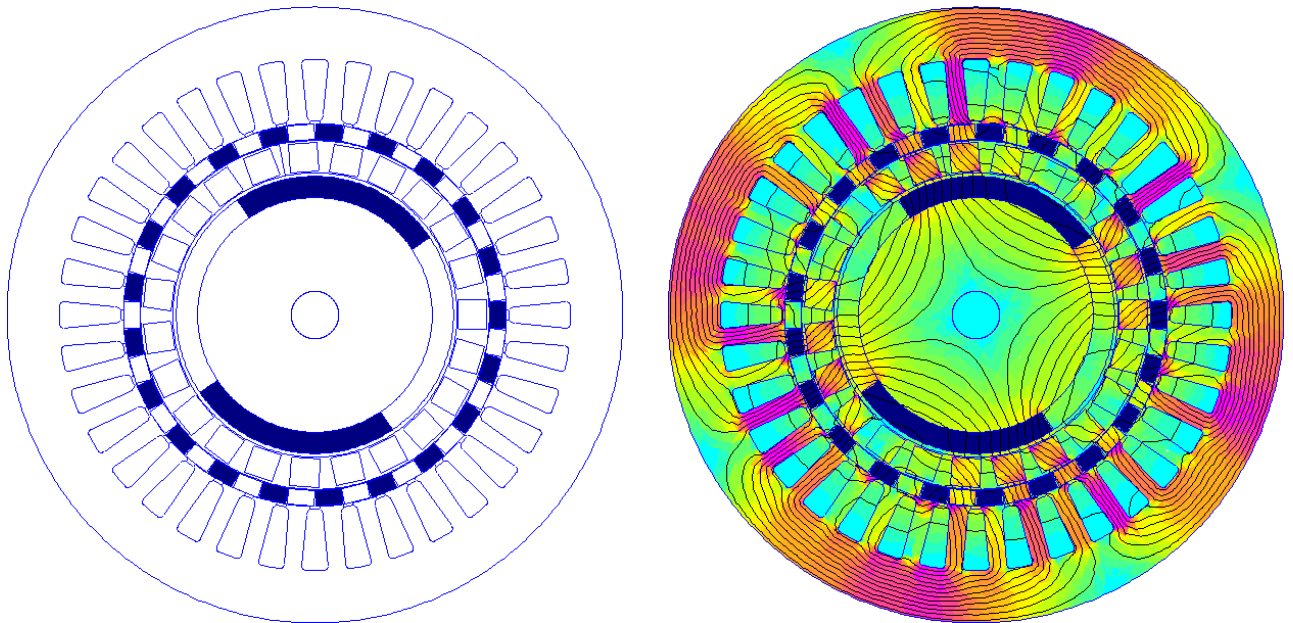


Figure. IV.30. Induction magnétique : position $\theta = 12^\circ$ et couple maximum négatif.

Conclusion

L'interaction entre les deux paires de pôles d'aimants du rotor interne avec les courants dans le bobinage du stator crée un couple électromagnétique qui va tourner le rotor interne, et l'interaction entre les deux paire de pôles d'aimants permanents du rotor interne et les 21 paire de pôles d'aimants permanents statorique produit le couple qui tourne le rotor externe .

Conclusion général

Au cours des dernières années, il ya eu un intérêt sans cesse croissant dans l'utilisation d'engins magnétiques comme les remplacements directs pour les engins mécaniques classiques.

Dans un certain nombre de secteurs d'application, engrenages magnétiques offrent des avantages sur leurs homologues mécaniques, par exemple, réduit les besoins de maintenance, l'isolement physique entre les arbres d'entrée et de sortie, maintenant tout cela est dans une seule machine appelle Pseudo Direct Drive.

Bibliographie

- [1] Contribution a la modélisation des systèmes couple machines convertisseur : application aux machine a aimants permanents. Thèse de Doctorat
- [2] Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variables électrique. Mémoire de Magister
- [3] Conception et modélisation d'une machine synchrone à 7 phases à aimants permanents et flux axial : commande vectorielle en modes normal et dégradé .Thèse De Doctorat
- [4] Commande d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents Sans Capteur de Vitesse. Utilisation d'Un Observateur Non Linéaire
- [5] Modeling and Control of 'Pseudo' Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machines Jiabin Wang and Kais Atallah Department of Electronic and Electrical Engineering, the University of Sheffield
- [6] IEEE transactions on industry applications, vol. 46, no. 1, january/february2010
- [7] K. Atallah, S. D. Calverley, D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high performance magnetic gear", IEE Proc. Elec. Power Appl., Vol. 151, pp135-143, 2004.
- [8] K. Atallah, et al, 'Pseudo direct-drive electrical machines', UK0607994.1/WO2007125284, filing date 24/04/2006.
- [9] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani, and D. Howe, "A novel 'pseudo' direct-drive brushless permanent magnet machine" IEEE Transactions on Magnetics, in press, 2008.
- [10] J. Rizk, M. H. Nagrial, and A. Hellany, "Analysis and design of magnetic torque couplers and magnetic gears," in Proc. 4th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (IPEMC), Aug. 14–16, 2004, pp. 1799–1804.
- [11] Magnetic Gear Device And Holding Member. May 23,2013.
- [12] S. McFee, J. P. Webb, and D. A. Lowther, "A tunable volume integration formulation for force calculation in finite-element based computational magnetostatics," IEEE Transactions on Magnetics, 24(1):439-442, January 1988.
- [13] P. P. Silvester, Finite elements for electrical engineers, Cambridge University Press, 1990.
- [14] A. G. Jack and B. C. Mecrow, "Methods for magnetically nonlinear problems involving significant hysteresis and eddy currents," IEEE Transactions on Magnetics, 26(2):424-429, March 1990.

-
- [15] E. M. Freeman and D. A. Lowther, "An open boundary technique for axisymmetric and three dimensional magnetic and electric field problems," IEEE Transactions on Magnetics, 25(5):4135
 - [16] E. M. Freeman and D. A. Lowther, "A novel mapping technique for open boundary finite element solutions to Poissons equation," IEEE Transactions on Magnetics, 24(6):2934
 - [17] F. Henrotte et al, "A new method for axisymmetric linear and nonlinear problems," IEEE Transactions on Magnetics, MAG