

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : - BENALI Saada Abdelbari

- BOUKHARI Ayoub Ilyess

Sujet

**Étude de l'effet des matériaux magnétiques sur la
performance d'une IPMSM à aimants enterrés**

Soutenu publiquement, le 29/06/2026, devant le jury composé de :

M KESSAL Abdelhalim	Professeur	Univ-BBA	Président
M HAMIMID Mourad	Professeur	Univ-BBA	Examineur
Mme BELGASMI Ibtissem	MCB	Univ-BBA	Encadrant
M Ladghem Chikouche Brahim	Professeur	Univ-M'sila	Invité

Remerciements

Je remercie avant tout الله Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'Il nous a accordées tout au long de ces années d'études, et qui nous ont permis d'atteindre cet objectif.

الحمد والشكر

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions tout d'abord notre encadrante, Dr. BELGASMI Ibtissem, pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et son accompagnement constant tout au long de ce projet. Son expertise et son exigence scientifique ont constitué une source précieuse d'apprentissage et d'enrichissement. Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants du département d'électromécanique pour la qualité de l'enseignement dispensé au cours de notre formation.

Nos sincères remerciements vont aussi à nos familles, pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements inconditionnels durant toutes ces années d'études.

Enfin, nous adressons une pensée reconnaissante à nos amis et camarades de promotion pour les échanges constructifs, l'entraide et les bons moments partagés.

Merci à tous

*D*édicaces de ABDELBARQ

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux, et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À mes frères, pour leur présence rassurante et leurs encouragements constants.

À mes enseignants et encadrants, pour leur patience, leurs conseils précieux et leur dévouement à transmettre le savoir.

À mes amis fidèles, pour les moments partagés, les mots de réconfort et l'entraide sincère.

Je vous dédie ce travail, modeste fruit d'efforts, avec tout mon respect et ma gratitude

BENALI

*D*édicaces de AYOUB

*À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel,
leurs sacrifices silencieux, et leur soutien indéfectible tout au
long de mon parcours.*

*À mes frères et ma sœur, pour leur présence rassurante
et leurs encouragements constants.*

*À mes enseignants et encadrants, pour leur patience,
leurs conseils précieux et leur dévouement à transmettre le
savoir.*

*À mes amis fidèles, pour les moments partagés, les
mots de réconfort et l'entraide sincère.*

*Je vous dédie ce travail, modeste fruit d'efforts, avec
tout mon respect et ma gratitude*

Boukhari

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'effet de différents matériaux magnétiques sur les performances d'une machine synchrone à aimants permanents à rotor enterré multicouche (IPMSM). Les simulations électromagnétiques sont réalisées avec FEMM. L'objectif est de comparer les résultats (distribution du champ magnétique et couple électromagnétique) pour différents matériaux afin de montrer leur influence sur les performances de la machine.

Mots clés : *Champ magnétique, matériaux magnétiques, Modélisation électromagnétique, Machine synchrone (IPMSM), logiciel FEMM, M-19 Steel, 455 Stainless Steel, Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V).*

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة تأثير المواد المغناطيسية المختلفة على أداء آلة متزامنة ذات دوار مدفون متعدد الطبقات ومغناطيس دائم (IPMSM). وقد أُجريت محاكاة كهرومغناطيسية باستخدام برنامج FEMM. والهدف هو مقارنة النتائج (توزيع المجال المغناطيسي وعزم الدوران الكهرومغناطيسي) لمواد مختلفة لتوضيح تأثيرها على أداء الآلة.

الكلمات المفتاحية: المجال المغناطيسي، المواد المغناطيسية، النمذجة الكهرومغناطيسية، الآلة المتزامنة (IPMSM)، برنامج FEMM، فولاذ M-19، الفولاذ المقاوم للصدأ 455، الفريت المغناطيسي الناعم (Fe-Ni-Zn-V).

Abstract

This work focuses on studying the effect of different magnetic materials on the performance of a multilayer buried rotor permanent magnet synchronous machine (IPMSM). Electromagnetic simulations are performed using FEMM. The objective is to compare the results (magnetic field distribution and electromagnetic torque) for different materials in order to demonstrate their influence on machine performance.

Keywords: *Magnetic field, magnetic materials, electromagnetic modeling, synchronous machine (IPMSM), FEMM software, M-19 Steel, 455 Stainless Steel, soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V).*

Table des matières

Résumé	5
Introduction Générale	- 1 -
1. ETAT DE L'ART	- 4 -
Introduction	- 4 -
1.1. Les matériaux magnétiques	- 4 -
1.1.1. Champ magnétique	- 4 -
1.1.2. Types des matériaux magnétiques.....	- 5 -
1.1.3. Théorie du ferromagnétisme.....	- 6 -
1.2. Les machines synchrones à aimant permanents	- 6 -
1.2.1. Etude d'une machine synchrone à aimants permanents	- 6 -
1.2.1.1. Définition de la Machine Synchrone	- 6 -
1.2.1.2. Constitution de la machine synchrone.....	- 6 -
1.2.2. Principaux matériaux utilisés dans les machines électriques	- 8 -
1.2.2.1. Aimants permanents	- 8 -
1.2.3. Choix de machines synchrones à aimants permanents	- 11 -
1.2.4. Différentes machines à aimants permanents.....	- 12 -
1.2.4.1. Machines synchrones à flux radial :	- 12 -
1.2.4.2. Machines synchrones à flux axial :.....	- 13 -
1.2.4.3. Machines synchrones à flux transverse :	- 13 -
1.2.5. Avantages et inconvénients des MSAP et domaine d'application :	- 13 -
1.2.6. Domaine d'application : Leurs domaines d'application sont nombreux et variés :....	- 14 -
Conclusion.....	- 14 -
2. Les simulations électromagnétiques.....	- 16 -
Introduction	- 16 -
2.1. Modélisation électromagnétique des machines étudiées	- 16 -
2.1.1. La méthode analytique :	- 17 -
2.1.2. La méthode semi-analytique :	- 17 -
2.1.2.1. La méthode de transformation conforme :	- 18 -
2.1.2.2. La méthode réseaux de réductances :	- 19 -
2.1.2.3. La méthode numérique :	- 20 -
2.2. Equation de Maxwell :	- 21 -
Cette relation signifie que la densité de courant est conservative :	- 22 -

2.3.	Conditions aux limites.....	- 24 -
2.4.	Calcul du couple de détente.....	- 24 -
2.5.	Expression de la force électromotrice fem et couple d'interaction	- 25 -
2.5.1.	Expression de la force électromotrice fem :	- 25 -
	La force électromotrice à vide est calculée par dérivation du flux créé par les aimants à travers les enroulements du stator comme suit :	- 25 -
2.5.2.	Couple d'interaction :	- 25 -
2.6.	FEMM : Présentation de l'outil de calcul utilisé	- 26 -
2.6.1.	Généralités sur le logiciel FEMM :	- 26 -
2.6.2.	Différentes étapes de simulation :	- 26 -
2.6.3.	Matériaux utilisés :	- 29 -
2.6.3.1.	M-19 Steel :	- 29 -
2.6.3.2.	455 Stainless Steel :	- 31 -
	☐ Très haute résistance mécanique.	- 31 -
	☐ Bonne résistance à la corrosion dans les environnements modérés.	- 31 -
	☐ Bonne résistance à l'usure.....	- 31 -
	☐ Traitement thermique pour augmenter la dureté et la résistance.	- 31 -
	☐ Bonne usinabilité et soudabilité avec précautions.....	- 31 -
	☐ Aéronautique :(Composants d'avions).....	- 32 -
	☐ Automobile :(Pièces moteur et transmission).....	- 32 -
	☐ Médical :(Instruments chirurgicaux).	- 32 -
	☐ Industrie pétrolière :(Composants mécaniques).	- 32 -
2.6.3.3.	Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V):	- 32 -
	☐ Très forte résistivité électrique limitant les courants de Foucault.	- 33 -
	☐ Faibles pertes magnétiques à haute fréquence.....	- 33 -
	☐ Bonne perméabilité magnétique.	- 33 -
	☐ Faible coercivité, facilitant l'aimantation et la désaimantation.....	- 33 -
	☐ Matériau léger et non conducteur.	- 33 -
-	Transformateurs haute fréquence.	- 34 -
-	Antennes et filtres.....	- 34 -
-	Noyaux magnétiques.	- 34 -
-	Suppresseurs de parasites EMI.	- 34 -
	Conclusion.....	- 34 -
3.	Résultats et Validations	- 36 -
	Introduction	- 36 -
3.1.	La machine synchrone à aimants permanents internes (IPMSM) :	- 36 -
3.1.1.	Définition :	- 36 -
3.1.2.	Caractéristiques :	- 36 -

3.1.3.	Pourquoi avons-nous choisi IPMSM ?	- 37 -
3.2.	Caractéristiques de la machine étudiée :	- 37 -
3.3.	Perméabilité des matériaux :	- 38 -
3.3.1.	Perméabilité de M-19 Steel :	- 38 -
3.3.2.	Perméabilité de 455 Stainless Steel :	- 38 -
3.3.3.	Perméabilité de soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V) :	- 38 -
3.4.	Résultats de simulation :	- 40 -
3.4.1.	A vide :	- 40 -
3.4.2.	En charge :	- 48 -
	Conclusion Générale	- 56 -
	Références	- 58 -

Table des figures

Figure 1-1 : Champ magnétique.	- 5 -
Figure 1-2 : Types des matériaux magnétiques.....	- 5 -
Figure 1-3 : Stator.....	- 7 -
Figure 1-4 : Rotor Avec Des Aimants.....	- 7 -
Figure 1-5 : Illustration d'une courbe B-H des aimants et de leurs points de fonctionnement .	- 8 -
Figure 1-6 : Les AlNiCo.....	- 9 -
Figure 1-7 : les ferrites.....	- 10 -
Figure 1-8 : Les terres rares	- 11 -
Figure 2-1 : Front de Pareto des modèles utilisés pour la conception des machines électriques.	- 16 -
Figure 2-2 : Représentation de l'ouverture de l'encoche dans le plan S.	- 18 -
Figure 2-3 : Principales étapes de la transformation conforme	- 19 -
Figure 2-4 : créer un problème	- 26 -
Figure 2-5 : Interface de FEMM.....	- 27 -
Figure 2-6 : Machine sans matériaux	- 27 -
Figure 2-7 : Définition des propriétés des matériaux et milieux	- 28 -
Figure 2-8 : Identification des matériaux	- 29 -
Figure 2-9 : Machine avec matériaux	- 29 -
Figure 3-1 : Fenêtre des propriétés du Ferrite (Fe-Ni-Zn-V) sous FEMM.....	- 39 -
Figure 3-2 : La géométrie de la machine en utilisant le matériau M-19 Steel.....	- 41 -
Figure 3-3 : La géométrie de la machine en utilisant le matériau Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V).....	- 42 -
Figure 3-4 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau 455 Stainless Steel.....	- 43 -
Figure 3-5 : Induction radiale B_n (T)	- 43 -
Figure 3-6 : Induction tangentielle B_θ (T).....	- 44 -
Figure 3-7 : couple de détente (N.M)	- 45 -
Figure 3-8 : Flux (Wb)	- 46 -
Figure 3-9 : Fem (V).....	- 47 -
Figure 3-10 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau M-19 Steel (en charge) -	- 48 -
Figure 3-11 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V).....	- 49 -
Figure 3-12 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau 455 Stainless Steel (en charge).....	- 50 -
Figure 3-13 : induction radiale $B_n(T)$	- 51 -
Figure 3-14 : induction tangentielle B_θ (T).....	- 52 -
Figure 3-15 : Le couple réactant (N.m).....	- 53 -

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : présente quelques caractéristiques des différents types d'aimants :[6]	- 11 -
Tableau 2-1 : présente les propriétés principales de M-19 steel.....	- 30 -
Tableau 2-2 : Avantages et inconvénients de M-19 steel	- 30 -
Tableau 2-3 : présente les propriétés principales de 455 stainless steel.....	- 31 -
Tableau 2-4 : avantages et inconvénients de 455 stainless steel	- 32 -
Tableau 2-5 : présente les propriétés principales de soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V) ...	- 33 -
Tableau 2-6 : avantages et inconvénients de soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V).....	- 33 -
Tableau 3-1 : les caractéristiques de la machine	- 37 -
Tableau 3-2 : Perméabilité de M-19 Steel.....	- 38 -
Tableau 3-3 : Perméabilité de 455 Stainless Steel.....	- 38 -

Introduction

Générale

Introduction Générale

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) occupent aujourd'hui une place essentielle dans de nombreux domaines industriels grâce à leurs performances élevées, leur rendement énergétique important, leur forte densité de puissance et leur grande fiabilité. Elles sont largement utilisées dans les véhicules électriques, les systèmes de production d'énergie renouvelable, l'aéronautique, la robotique et les entraînements industriels à vitesse variable. Parmi les différentes structures existantes, la machine synchrone à aimants permanents à rotor enterré multicouche (IPMSM) se distingue par sa capacité à développer un couple élevé, sa large plage de fonctionnement et ses bonnes performances en affaiblissement de flux.

Les performances électromagnétiques de ces machines dépendent fortement des propriétés des matériaux constituant le circuit magnétique. Le choix du matériau influence directement la distribution du flux magnétique, le niveau de saturation, les pertes magnétiques, la force électromotrice induite ainsi que le couple développé par la machine. Ainsi, l'étude comparative des matériaux magnétiques représente une étape importante dans l'optimisation de la conception des machines électriques modernes.

Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse à l'analyse de l'influence de différents matériaux magnétiques sur les performances d'une machine IPMSM. L'étude est réalisée à l'aide du logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics), basé sur la méthode des éléments finis, qui permet une modélisation précise du comportement électromagnétique de la machine. Trois matériaux ont été considérés : le **M-19 Steel**, le **455 Stainless Steel** et la **ferrite magnétique douce Fe-Ni-Zn-V**. Les résultats obtenus sont comparés à travers plusieurs grandeurs caractéristiques telles que la distribution du champ magnétique, la densité de flux, le flux magnétique, la force électromotrice, le couple de détente et le couple réluctant.

L'objectif principal de ce travail est d'identifier le matériau offrant le meilleur compromis entre les performances électromagnétiques et les contraintes de

fonctionnement de la machine, afin de contribuer à l'amélioration de son rendement et de ses performances globales.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente un état de l'art sur les matériaux magnétiques et les machines synchrones à aimants permanents. Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de modélisation électromagnétique et à la présentation de l'outil de simulation FEMM ainsi qu'aux matériaux étudiés. Enfin, le troisième chapitre expose les résultats des simulations, leur analyse comparative et la validation des performances de la machine pour les différents matériaux considérés.

Chapitre 01 :

Etat de l'art

1. ETAT DE L'ART

Introduction

Aujourd'hui, les machines à aimants occupent une place importante dans les applications industrielles de petite puissance où l'on recherche compacité, rusticité et bon rendement (robotique, électroménager, etc....) ; de moyenne puissance (machines-outils, véhicules électriques ; aéronautique, etc....) pour les entraînements à vitesse variable ainsi que pour les grandes puissances en particulier dans la traction ferroviaire, la propulsion navale et la production de l'énergie électrique (éoliennes).

Ce chapitre présente les bases des machines synchrones à aimants permanents (MSAP). Il commence par l'étude des matériaux magnétiques, en abordant le champ magnétique, les différents types de matériaux et la théorie du ferromagnétisme.

Ensuite, il traite des MSAP en expliquant leur fonctionnement, les matériaux utilisés, leurs différentes structures ainsi que les critères de choix.

Enfin, le chapitre met en évidence les avantages et les inconvénients de ces machines, ainsi que leurs principaux domaines d'application dans l'industrie et les systèmes modernes.

1.1. Les matériaux magnétiques

1.1.1. Champ magnétique

Le champ magnétique est une région de l'espace où s'exercent des forces magnétiques issues de charges électriques en mouvement ou d'aimants permanents, et il joue un rôle critique dans la conversion d'énergie au sein des machines électriques.

Ce champ est caractérisé par un vecteur B , et s'exprime en tesla (T) dont les lignes de force circulent du pôle nord vers le pôle sud à l'extérieur de la source, formant des circuits fermés qui illustrent l'absence de monopôle magnétique. Dans les dispositifs industriels comme les moteurs synchrones, la performance dépend de l'interaction entre ces lignes de champ et les matériaux ferromagnétiques : la capacité d'un matériau à canaliser ce flux est définie par sa perméabilité, tandis que sa capacité

à conserver ou résister à une aimantation est dictée par sa coercivité et son cycle d'hystérésis.

Ces propriétés sont essentielles pour optimiser le couple et minimiser les pertes énergétiques, notamment lors de l'utilisation d'aimants haute performance comme les alliages de terres rares.[1]

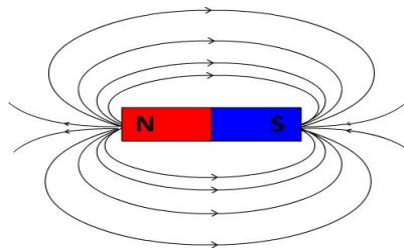


Figure 1-1 : Champ magnétique.

1.1.2. Types des matériaux magnétiques

Il existe trois types de matériaux magnétiques :

Matériaux Ferromagnétiques qui s'aimantent fortement en présence d'un champ magnétique. Exemple : Fer, Nickel, Cobalt

Matériaux paramagnétiques qui s'aimantent faiblement dans la même sens que le champ magnétique. Exemple : platine, sodium, aluminium, chrome, manganèse...etc.

Matériaux diamagnétiques qui s'aimantent très faiblement en sens inverse du champ magnétique.[2]

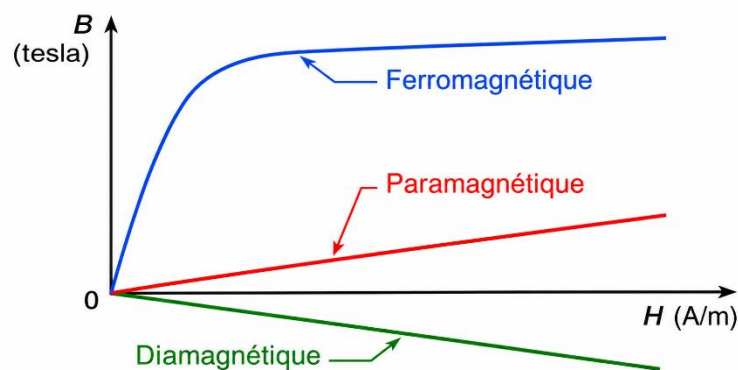


Figure 1-2 : Types des matériaux magnétiques

1.1.3. Théorie du ferromagnétisme

Le ferromagnétisme est un phénomène physique complexe où certains matériaux développent une aimantation spontanée et permanente. Contrairement aux matériaux paramagnétiques qui ne réagissent qu'en présence d'un champ extérieur, les ferromagnétiques conservent une mémoire magnétique grâce à l'interaction d'échange, une force quantique qui force les spins des électrons à s'aligner parallèlement.

Cet alignement s'organise en micro-régions appelées domaines de Weiss ; si ces domaines sont initialement désordonnés, l'application d'un champ externe les oriente durablement, créant ainsi un aimant. Ce comportement est défini par un cycle d'hystérésis, qui mesure la résistance du matériau à la désaimantation (coercitive) et sa capacité à retenir un flux magnétique (rémanence), jusqu'à ce que l'agitation thermique, au-delà de la température de Curie, ne finisse par briser cet ordre naturel.

1.2. Les machines synchrones à aimant permanents

1.2.1. Etude d'une machine synchrone à aimants permanents

1.2.1.1. Définition de la Machine Synchrone

La machine synchrone est un système électrique permettant de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique « génératrice » et inversement « moteur ». Ce type de machine qui fournit l'énergie électrique appelée par le réseau de distribution dans les centrales électriques « on parle d'alternateur ». Néanmoins, on la rencontre peu dans les applications domestiques, car elle est plus coûteuse à fabriquer et moins robuste que la machine asynchrone. [3]

1.2.1.2. Constitution de la machine synchrone

La Machine Synchrone possède deux parties principales : L'inducteur porté le plus souvent par le rotor L'induit porté par le stator parcouru par des courants alternatifs.[4]

Induit (stator) : Le stator est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles mince (de l'ordre de 0.5 mm d'épaisseur) en acier au silicium.

Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courant de Foucault.

Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.

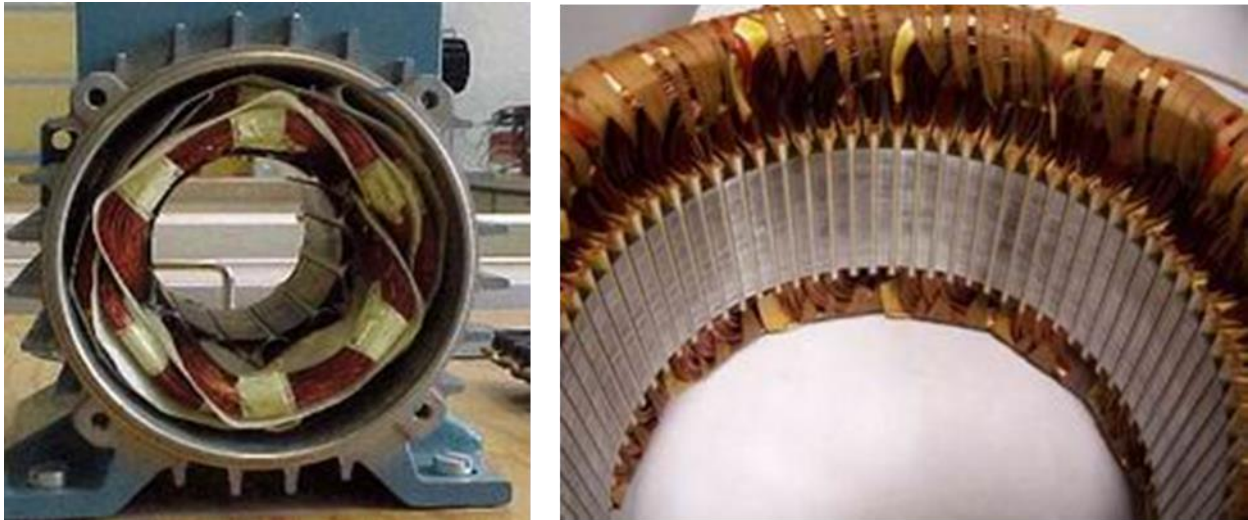


Figure 1-3 : Stator

Inducteur (Rotor) : Le rotor est la partie mobile du moteur synchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement d'une succession de pôles Nord et Sud intercalés sous forme d'aimants permanents ou de bobines d'excitation parcourues par un courant continu.



Figure 1-4 : Rotor Avec Des Aimants

1.2.2. Principaux matériaux utilisés dans les machines électriques

1.2.2.1. Aimants permanents

Définition :

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

Généralité sur les caractéristiques des aimants permanents :

Les propriétés des aimants permanents sont déterminées à partir de leur cycle d'hystérésis, notamment la branche de désaimantation située dans le deuxième quadrant du diagramme B-H (Figure1-5). Cette courbe met en évidence plusieurs grandeurs fondamentales. On distingue d'abord l'induction rémanente (B_r), qui représente l'induction conservée par le matériau en absence de champ externe.

Le champ coercitif lié à l'induction (H_{cB}) correspond au champ inverse nécessaire pour annuler cette induction ; une valeur élevée traduit une meilleure stabilité face à la désaimantation. Le produit d'énergie maximal $(BH)_{max}$ exprime la capacité énergétique volumique maximale de l'aimant. Les valeurs (B_m, H_m) définissent le point de fonctionnement optimal pour lequel ce produit d'énergie est maximal. Enfin, le champ coercitif intrinsèque (H_c) est le champ requis pour annuler l'aimantation propre du matériau. Ces paramètres constituent les critères essentiels pour évaluer les performances magnétiques d'un aimant permanent.[5]

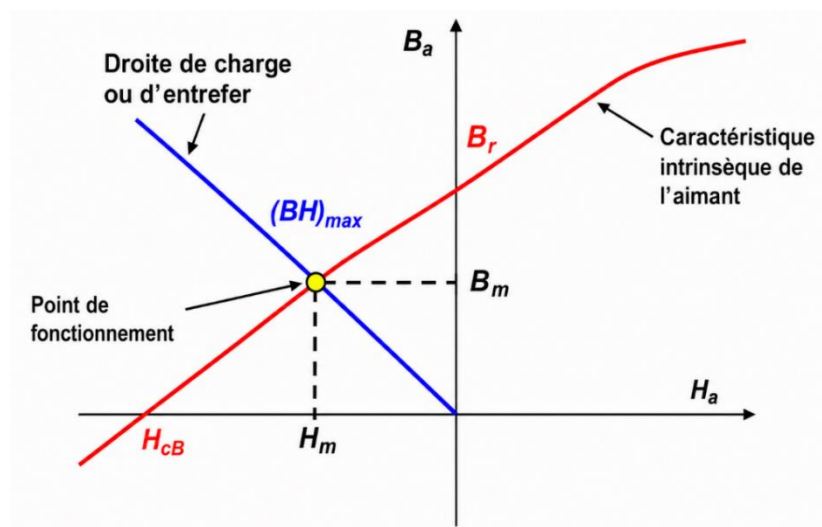


Figure 1-5 : Illustration d'une courbe B-H des aimants et de leurs points de fonctionnement

Les différents types d'aimants permanents :

Les AlNiCo:

Les aimants Alnico (ou Ticonal) Découverts dans les années 30 au Japon, composé de fer, cobalt, nickel et aluminium, Ils peuvent être isotropes ou anisotropes, présentant des inductions magnétiques rémanentes d'environ 0,7 T et 1,2 T respectivement. Aujourd'hui, leur utilisation est limitée en raison de leur champ coercitif modeste (H_{CJ} compris entre 50 et 85 kJ/m³) et du coût élevé du cobalt. En effet, l'augmentation du pourcentage de cobalt renforce le champ coercitif mais diminue parallèlement la polarisation rémanente.

Ces aimants présentent néanmoins une excellente stabilité thermique, leur température de fonctionnement pouvant atteindre 550 °C.



Figure 1-6 : Les AlNiCo

Les Ferrites :

Découverts dans les années 1950, les ferrites comptent parmi les aimants les plus utilisés aujourd'hui, en raison de leur coût faible et de leur rigidité magnétique élevée, malgré des performances relativement modestes.

Ils présentent toutefois deux inconvénients principaux : une faible aimantation rémanente, limitant la densité volumique d'énergie à environ 35 kJ/m³, et une sensibilité plus marquée à la température par rapport aux AlNiCo.

Les ferrites sont des composés d'oxydes de fer, de baryum et de strontium, obtenus par frittage, et peuvent être isotropes ou anisotropes. Avec une aimantation

rémanente typique d'environ 0,4 T, elles sont surtout utilisées dans les machines à faible puissance et à coût réduit. Pour obtenir des couples plus élevés, des conceptions de machines plus complexes, basées sur la concentration de flux, peuvent être envisagées.



Figure 1-7 : les ferrites

Les terres rares :

Les Samarium cobalt (SM Co) :

Ils ont été découverts dans les années 60, les composés Samarium-Cobalt (SmCo) représentent un véritable saut de performance, avec une densité d'énergie pouvant atteindre 270 kJ/m³. Bien que leur induction rémanente soit limitée à 1,0 T et que leur coût reste élevé en raison de la teneur en cobalt, ils restent indispensables pour les applications critiques. Leur principal atout réside dans leur stabilité thermique exceptionnelle : le Sm₂Co₁₇ peut fonctionner efficacement jusqu'à 550 °C, là où d'autres aimants puissants perdraient toute leur aimantation.

Les Néodymes fer bore (NdFeB) :

Découvert dans les années 80, les aimants terres rares à base de néodyme ont l'avantage d'être moins coûteux que les aimants à base de samarium.

En effet, le néodyme est beaucoup plus abondant (6 à 10 fois plus) que le Samarium. Actuellement, on trouve des aimants avec une polarisation rémanente de 1,48 T à 20°C pour une densité volumique d'énergie de 422kJ/m³ et une température maximale de fonctionnement de 80°C.

Chapitre 01 : *Etat de l'art*

L'inconvénient majeur de ces aimants est leur température maximale de fonctionnement qui ne dépasse guère les 160°C. En général, l'influence néfaste de la température est beaucoup plus accrue pour les aimants à forte induction rémanente, surtout en ce qui concerne le champ coercitif. Néanmoins, ces aimants occupent aujourd'hui une grande part du marché dans les applications électriques.

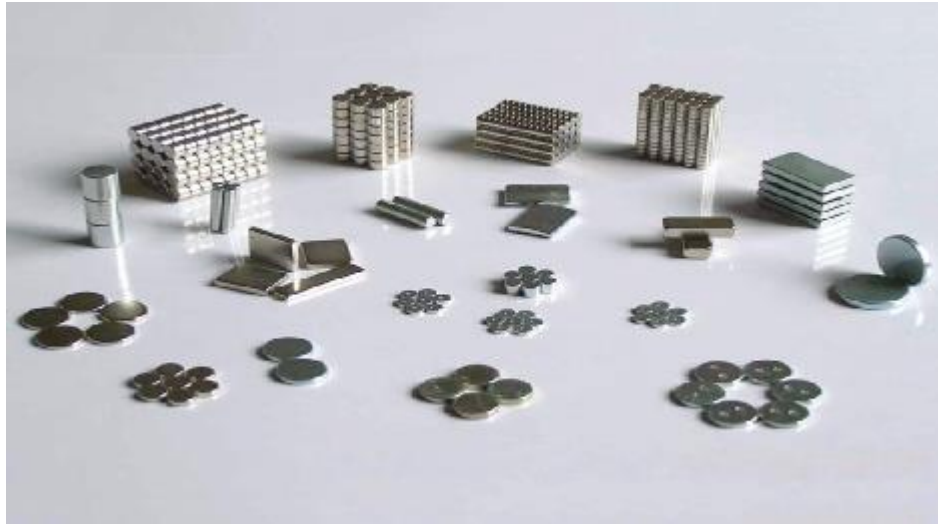


Figure 1-8 : Les terres rares

Le choix d'un aimant dépend à la fois des propriétés magnétiques recherchées et de son prix, qui peut varier fortement. [6]

Tableau 1-1 : présente quelques caractéristiques des différents types d'aimants :[6]

Type D'aimants	Densité d'énergie (BH)max (kJ/ m3)	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif Hc (kA/m)	Température Tmax (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co5	140-200	1	2000	280	220
Sm2 Co17	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites Strontium	27-35	0.3-0.4	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0.2-0.4	170	100-240	4.5

1.2.3. *Choix de machines synchrones à aimants permanents*

Le choix d'une machine synchrone à aimants permanents repose principalement sur un compromis entre les performances recherchées et les contraintes de conception

et de fabrication. Pour des applications nécessitant une structure simple et une vitesse de rotation modérée, les machines à aimants en surface, généralement à flux radial, constituent une solution adaptée grâce à leur simplicité de réalisation et leur bon rendement, pour des applications exigeant des vitesses élevées ou un fonctionnement efficace en régime de dé fluxage, comme dans les véhicules électriques, les machines à aimants enterrés sont privilégiées. Elles offrent une meilleure tenue mécanique à grande vitesse ainsi qu'un couple supplémentaire dû à la réluctance, ce qui améliore les performances globales et élargit la plage de fonctionnement.

Le choix du matériau des aimants joue un rôle déterminant : les aimants à base de néodyme sont utilisés pour leurs fortes performances magnétiques, tandis que le samarium-cobalt est préféré pour sa meilleure résistance aux températures élevées. Enfin, le type de bobinage et l'architecture globale de la machine sont définis en fonction des contraintes d'encombrement, du coût et du rendement visé.

1.2.4. *Différentes machines à aimants permanents*

1.2.4.1. *Machines synchrones à flux radial :*

Historiquement, la machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents utilisée dans l'industrie. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et à l'amélioration des performances des aimants, elle tend aujourd'hui à remplacer la machine asynchrone dans de nombreuses applications.

La première configuration développée comportait un bobinage réparti au stator et des aimants placés en surface du rotor. Cependant, cette disposition limite les applications à grande vitesse à cause du risque de décollement des aimants sous l'effet de la force centrifuge.

Pour réduire ce risque, une solution consiste à adopter une topologie à rotor externe, où les aimants sont plaqués contre le rotor par la force centrifuge, ce qui améliore leur maintien. Bien que cette structure soit plus complexe et nécessite davantage d'aimants, elle permet d'obtenir un diamètre de rotor plus grand, un nombre de pôles plus élevé et donc un couple plus important.

1.2.4.2. Machines synchrones à flux axial :

Ces machines ont été largement étudiées pour les applications éoliennes à entraînement direct. Pour une machine de faible longueur axiale, la machine à flux axial produit un couple plus élevé que la machine à flux radial, car son volume d'entrefer est plus important.

Elle est particulièrement adaptée aux applications à basse vitesse, où elle conserve une structure compacte, contrairement à la machine radiale qui devient plus volumineuse.

Cela lui permet d'avoir un meilleur couple volumique. De plus, il est possible d'assembler plusieurs modules sur le même axe pour augmenter le couple total. Cependant, les forces d'attraction axiales entre le rotor et le stator nécessitent un renforcement mécanique, ce qui augmente le poids et le coût de la machine.

1.2.4.3. Machines synchrones à flux transverse :

La machine à flux transverse (MFT) représente une technologie innovante, particulièrement performante lorsqu'elle utilise des aimants permanents à concentration de flux. Son atout majeur réside dans son couple massique exceptionnel et sa capacité à intégrer un grand nombre de pôles, ce qui la rend idéale pour l'entraînement direct sans réducteur.

Toutefois, cette puissance s'accompagne d'une grande complexité de fabrication et d'une réactance synchrone élevée qui dégrade le facteur de puissance. De plus, sa commande électronique est rendue difficile par une induction non sinusoïdale et de fortes saturations locales, limitant pour l'instant son usage principal au mode moteur plutôt qu'en génératrice.[7]

1.2.5. Avantages et inconvénients des MSAP et domaine d'application :

Les avantages :

Rendement élevé : absence de pertes cuivre au rotor (pas d'excitation bobinée). Densité de puissance importante : couple massique élevé. Bon facteur de puissance. Plus fiable. Maintenance réduite (pas de bagues ni balais). Excellentes performances dynamiques

(adaptées au contrôle vectoriel). Large plage de vitesse avec affaiblissement de flux. Fonctionnement possible en génératrice (freinage régénératif).

Les inconvénients :

Coût des terres rares : La fabrication des aimants performants (Néodyme, Samarium-Cobalt) est coûteuse.

- . Dans le cas d'un dysfonctionnement de l'électronique, le moteur ne peut pas
Tourner tout seul.
- . Sensibilité thermique des aimants.
- . La commutation doit être faite électroniquement, ce qui rend le contrôle un peu plus compliqué.

1.2.6. *Domaine d'application : Leurs domaines d'application sont nombreux et variés :*

– les équipements domestiques (machine à laver le linge), – les automobiles, – les équipements de technologie de l'information (DVD drives), – les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements, – les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste), – les servomoteurs, – les applications robotiques, – la production d'électricité, – la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins – les machines-outils, – les applications de l'énergie de l'éolienne.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la machine synchrone à aimants permanents, sa constitution fondamentale (partie induit et partie inducteur), aussi nous pouvons distinguer les différents types de machines synchrones à aimants permanents, Ainsi nous avons mis en évidence les avantages, les inconvénients et les domaines d'application de la machine synchrone à aimants permanents et nous avons abordé dans cette partie les matériaux magnétiques en présentant tout d'abord la notion de champ magnétique, puis les différents types de matériaux magnétiques. Enfin, nous avons étudié la théorie du ferromagnétisme.

Chapitre 02 :

Les simulations

électromagnétiques

2. Les simulations électromagnétiques

Introduction

Ce chapitre présente la modélisation électromagnétique des machines étudiées (les méthodes). Les équations de Maxwell et les conditions aux limites utilisées dans l'étude. Ensuite, les expressions de la force électromotrice (f.é.m.) et du couple d'interaction sont présentées, ainsi que le calcul du couple de détente.

Enfin, une présentation du logiciel FEMM, utilisé pour la simulation et l'analyse des performances électromagnétiques des machines.

2.1. Modélisation électromagnétique des machines étudiées

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour modéliser les machines synchrones. Elles sont classées en trois grandes familles : analytiques, semi-analytiques et numériques, chacun leurs avantages et leurs inconvénients.

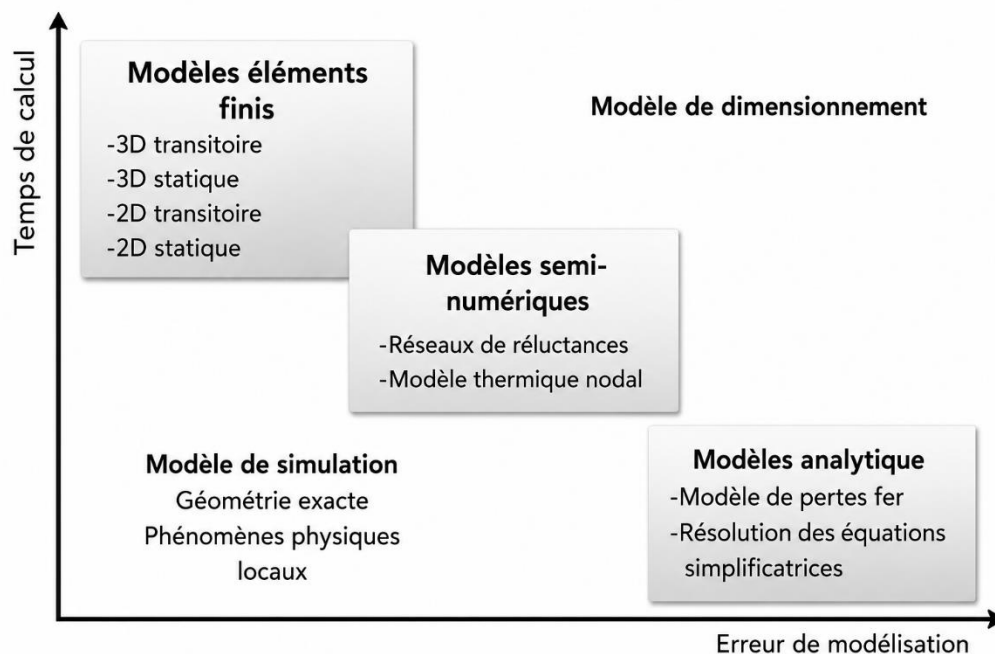


Figure 2-1 : Front de Pareto des modèles utilisés pour la conception des machines électriques.

2.1.1. La méthode analytique :

La méthode analytique est très souvent utilisée pour modéliser les machines. Le point fort de cette méthode est son temps d'exécution très faible. La granularité obtenue Avec cette méthode dépend fortement des hypothèses qui ont été posées.

Il est tout à fait possible d'obtenir un modèle très fin, bien meilleur que par une méthode éléments finis, mais les hypothèses émises sont souvent incompatibles avec la modélisation souhaitée. Ainsi il est tout à fait possible de calculer le champ magnétique et électrique exact d'un conducteur de section ronde soumis à une courante alternative haute fréquence et d'observer l'effet de peau. Par contre il ne sera pas possible de modéliser des conducteurs de sections rectangulaires sauf à faire l'hypothèse d'un conducteur infiniment long sur une dimension [8].

L'utilisation des méthodes analytiques demande donc d'analyser et de poser Les bonnes hypothèses et oblige donc le concepteur de très bien connaître le Comportement des composants magnétiques afin d'être sûr de la validité et des limites du modèle.

La modélisation analytique telle qu'elle a été présentée, se base sur les équations physiques régissant le composant. D'autres méthodes analytiques existent permettant de modéliser un système. Il est ainsi possible d'utiliser des surfaces de réponses obtenues par plan d'expérience.

La transformation conforme est également une méthode analytique puissante, permettant de résoudre le problème en partant d'une géométrie simple. Cette méthode a été beaucoup utilisée pour calculer analytiquement le champ magnétique dans l'entrefer d'une machine électrique [8].

2.1.2. La méthode semi-analytique :

Les méthodes semi-numériques (semi-analytique) sont analytiques et non linéaires. Ils sont qualifiés de cette manière car leur résolution se fait numériquement en raison de la non-linéarité.

Ils ont une position intermédiaire entre les modèles analytiques et les modèles éléments finis pour : Le temps de résolution, la précision de la modélisation et la capacité à fournir les dérivées. Parmi ces méthodes, on peut citer : - Les réseaux de

perméances, - Transformation conforme, - Les modèles thermiques nodaux, - Les schémas électriques équivalents.

La méthode demi-analytique cherche à mettre le problème sous forme de circuit électrique équivalent. Chaque élément du circuit est déterminé analytiquement et la résolution est numérique en mettant le problème sous forme matricielle grâce aux équations de Kirchhoff. Il suffit alors d'un schéma numérique d'inversion de matrice.[9]

2.1.2.1. La méthode de transformation conforme :

La transformation conforme est la représentation d'une surface limitée liée à un plan d'une autre variable complexe. La distribution du champ entre les frontières d'une forme complexe, comme la structure d'ouverture des encoches, est généralement difficile à calculer, il devient donc approprié de trouver une transformation permettant de modifier un plan complexe en un autre dont lequel les formes des frontières deviennent plus simples et pour lesquelles la distribution du champ est régulière et connue.

Le principe de base de cette méthode est expliqué dans le cas où l'encoche est infiniment profonde comme le montre la Figure2-2. [10]

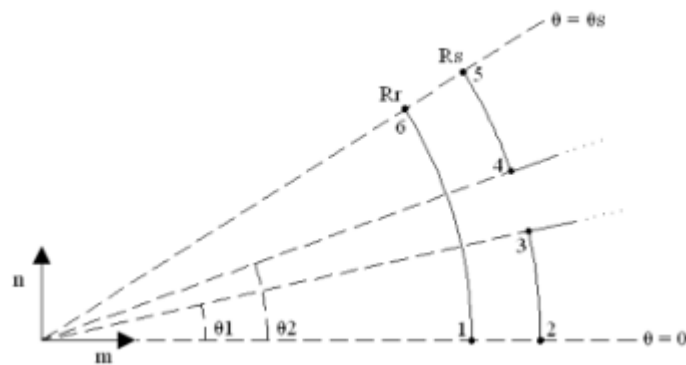


Figure 2-2 : Représentation de l'ouverture de l'encoche dans le plan S.

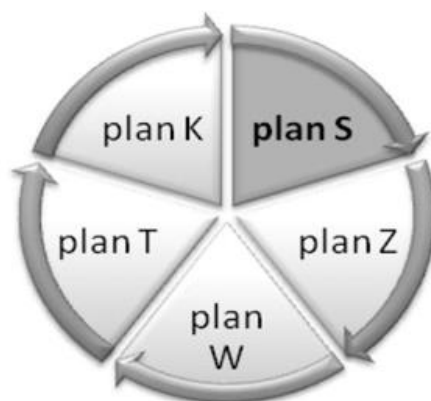


Figure 2-3 : Principales étapes de la transformation conforme

2.1.2.2. La méthode réseaux de ré reluctances :

La méthode des réseaux de ré reluctances (ou de perméances) est une des méthodes les plus anciennes utilisée pour la modélisation et l'analyse des dispositifs électromagnétiques. Son utilisation dans le domaine de l'électrotechnique est par exemple antérieure à celle des éléments finis. Cependant, de nos jours, son manque de généralité a limité son utilisation en comparaison de la modélisation par la méthode des éléments finis [11].

Les modèles ré reluctants font parties des modèles dit semi-analytiques ou semi-numériques. Ces modèles s'appuient sur la représentation de la machine par un circuit magnétique équivalent. Pour chaque trajet de flux et suivant la nature du tube de flux, il est possible de symboliser une ré reluctance magnétique équivalente dépendant du matériau ou de l'air. N'a alors accès aux valeurs des flux et des inductions pour chaque élément du circuit. Par rapport aux modèles analytiques et numériques, les modèles ré reluctants ont l'avantage de disposer d'un bon compromis entre la rapidité et la finesse des résultats.

L'appellation semi-analytique provient du fait que la formulation des éléments du réseau se fait de façon analytique et que la résolution du système d'équations est numérique. Souvent, on n'aboutit pas à la dérivée formelle des grandeurs.

En fait, contrairement à ce qu'on croit souvent à tort, il est tout de même possible de dériver de manière formellement exacte beaucoup de modèles non-explicites. Par rapport aux modèles purement analytiques, les modèles ré reluctants ont aussi l'avantage de prendre en compte plus de phénomènes physiques tels que la saturation magnétique,

les harmoniques dans certains cas, les pertes fer, etc. En revanche, même s'il est possible d'intensifier la complexité du modèle par le rajout d'éléments supplémentaires, leur niveau de finesse reste tout de même inférieur aux modèles éléments finis.

Enfin, en temps de développement, les modèles réductants sont encore situés entre les modèles analytiques et numériques. Il est nécessaire de connaître le trajet des flux magnétiques et d'identifier les bonnes réductances aux bons emplacements. Pour ce faire, on visualise les trajets de flux grâce à des simulations éléments finis. L'inconvénient est qu'avec un circuit réductant, il n'est pas possible d'être rigoureusement précis pour chaque niveau de saturation.[12]

2.1.2.3. La méthode numérique :

Les méthodes numériques sont plus ou moins utilisées selon le problème et la structure à étudier. Ces méthodes sont utilisées seules ou en combinaison. Parmi celles-ci méthodes nous citerons la méthode des différences finies, la méthode des intégrales de frontières, la méthode des volumes finis et enfin la méthode des éléments finis [13].

Dans le cas de la structure étudiée dans notre travail, on applique la méthode des éléments finis.

a) Méthode des différences finies (MDF) : La méthode des différences finies, présente une technique de résolution des équations aux dérivées partielles, par l'approximation de dérivées par des différences finies. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre déterminé de nœuds et à représenter la fonction recherchée en chacun des nœuds du domaine par un développement limité en série de Taylor. Ainsi, l'équation différentielle est transformée en équation algébrique pour chaque nœud. La résolution du système d'équations algébriques permet d'obtenir la distribution de la fonction étudiée dans le domaine d'étude. L'inconvénient de cette méthode est la précision et la manque de la flexibilité.[14]

b) Méthode des Volumes Finis (MVF) : La méthode des volumes finis consiste à effectuer un bilan local sur des volumes élémentaires (les éléments du maillage), en intégrant sur ces éléments les équations écrites sous forme de loi de conservation. Cette

approche exprime les échanges qui s'opèrent entre les différents éléments du maillage via la définition de flux numériques aux interfaces.

c) La méthode des intégrales des frontières (MIF) : Cette méthode est largement utilisée pour l'étude de structure tridimensionnelle ou lorsque l'air ou les milieux passifs occupent une grande partie du domaine d'étude. Cette méthode permet de ramener le maillage à la frontière du domaine ainsi le calcul des valeurs de l'inconnue sur les frontières du domaine suffit pour obtenir la solution en tout point du domaine. La MIF utilise le théorème de GREEN OSTROGRADSKI.

d) Méthode des Eléments Finis (MEF) : La méthode des éléments finis permet de représenter finement les différentes grandeurs dans le système. Cependant, les résultats obtenus restent « gourmands » en ressources informatiques, et ne peuvent donc pas être directement exploités dans les structures actuelles de commande ou de diagnostic. La détermination des champs électromagnétiques est d'un grand intérêt pour la conception des machines électriques. L'analyse de ces phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution des équations de Maxwell dont la complexité est telle qu'elle est exclue dans la plupart des cas du formalisme analytique. [15]

2.2. Equation de Maxwell :

Bien que la plupart des modèles analytiques soient issus de la résolution des équations de Maxwell dérivées de la formulation magnétostatique, certains travaux concernent la résolution des équations issues de la formulation magnétodynamique [16]. L'utilisation de la formulation magnétodynamique permet de tenir compte des courants induits dans les parties conductrices. Cette prise en compte des courants induits se traduit par des équations plus compliquées. Cependant, l'utilisation de la formulation magnétostatique s'avère souvent suffisante dans le cas des machines à aimants permanents où l'on cherche à minimiser les ondulations du couple ainsi que les courants induits dès les premières étapes du dimensionnement [17]. La détermination du champ électromagnétique est d'un grand intérêt lors de la conception des machines électriques. En effet, le dimensionnement et l'évaluation d'une machine synchrone

reposent sur la connaissance des inductions dont découle le calcul des efforts dans les conducteurs, des ampères-tours consommés dans les circuits magnétiques, des flux utiles, des flux de fuite, des réactances, etc. L'analyse de ces phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution des équations de Maxwell suivantes :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2-2)$$

Où $\vec{H}$ et $\vec{B}$ sont respectivement le champ magnétique et l'induction magnétique, $\vec{D}$ est l'induction électrique, $\vec{J}$ est la densité volumique de courant. Le modèle magnétostatique s'applique aux dispositifs électrotechniques dans lesquels les sources de courant ou de tension sont indépendantes du temps et dans lesquels il n'y a aucune pièce en mouvement. C'est le cas des dispositifs statiques pour lesquels les champs sont créés par des aimants permanents. Dans ces conditions, on obtient la forme locale du théorème d'Ampère :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (2-3)$$

Cette relation signifie que la densité de courant est conservative :

$$\overrightarrow{\text{div}} \vec{J} = 0 \quad (2-4)$$

Le comportement électrique et magnétique des différents milieux du domaine est pris en compte par les lois de comportement. Dans un problème d'électrotechnique, la conductivité électrique est généralement supposée constante ou nulle dans chaque milieu. On obtient alors une relation de la forme :

$$\vec{J} = \vec{J}_{\text{source}} + \sigma \vec{E} \quad (2-5)$$

Où σ , $\vec{J}_{\text{source}}$ sont respectivement la conductivité électrique et la densité volumique de charges électriques. Si on néglige le phénomène d'hystérésis du circuit magnétique, il est possible de représenter l'induction magnétique sous la forme :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2-6)$$

Où μ_0 est la perméabilité de l'air et μ_r la perméabilité relative. Pour les matériaux ferromagnétiques, on peut utiliser des modèles relativement complexes qui tiennent en compte du phénomène d'hystérésis mais leur introduction dans des modèles

numériques conduit à une augmentation du temps de calcul qui peut être acceptable en 2D mais qui devient exorbitant en 3D. Dans le cas des matériaux durs (aimants permanents), le phénomène de rémanence est introduit, et on obtient une loi de la forme :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{M} \quad (2-7)$$

Où $\vec{M}$ représente l'induction rémanente. Pour la plupart des aimants véritablement permanents, la perméabilité est considérée comme constante et proche de celle de l'air. Comme $\vec{B}$ est un champ de vecteur à divergence nulle, l'induction magnétique dérive d'un potentiel vecteur magnétique tel que :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (2-8)$$

La résolution des équations de Maxwell et des lois de comportement associées peut être obtenue en considérant les champs comme inconnues. Néanmoins, on préfère exprimer les champs magnétiques en fonction de potentiels qui peuvent être scalaires ou vectoriels. On peut calculer aisément l'induction magnétique B si le potentiel vecteur magnétique A est connu. Helmholtz (Le théorème de Helmholtz) a démontré qu'un vecteur ne peut être défini que si son rotationnel et sa divergence sont à la fois donnés [PMH55]. Dans ce cas, la Relation (8) ne suffit pas pour définir le vecteur A ; il faut donc en plus définir sa divergence. Pour pallier ce problème, on utilise la jauge de Coulomb :

$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad (2-9)$$

En tenant compte des équations (7), (8) et (9), on peut écrire :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = -J + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \vec{M} \right) \quad (2-10)$$

Pour chaque région, les inductions radiale et tangentielle s'expriment selon les relations suivantes :

$$B_r(r, \theta) = \frac{1}{r} \frac{\partial A(r, \theta)}{\partial \theta} \quad (2-11)$$

$$B_\theta(r, \theta) = - \frac{\partial A(r, \theta)}{\partial r} \quad (2-12)$$

2.3. Conditions aux limites

Quel que soit le degré de complexité des géométries des structures, on distingue deux types de conditions qui séparent deux domaines adjacents ; l'un selon la direction tangentielle et l'autre selon la direction radiale.

La continuité de la composante normale est possible si deux domaines adjacents ont la même perméabilité relative. Il s'agit de la conservation du flux ou de la composante normale de l'induction magnétique lors du passage entre deux milieux adjacents.

Le cas échéant la perméabilité relative du milieu sera introduite pour les composantes radiale et tangentielle du champ magnétique entre deux domaines adjacents.

$$\vec{n1} \cdot \vec{B1} = \vec{n2} \cdot \vec{B2} \quad (2-13)$$

$$\vec{n1} \cdot \vec{H1} - \vec{n2} \cdot \vec{H2} = Js \quad (2-14)$$

Les conditions aux limites permettent de calculer les constantes des expressions des potentiels vecteurs établies dans chaque zone constitutive de la machine. Deux types de conditions aux limites peuvent être distingués : Conditions aux frontières du domaine d'étude de type « Dirichlet » ou de type « Newman ».

2.4. Calcul du couple de détente

Couple de détente : Quand les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une reluctance variable qui entraîne un couple de valeur moyenne nulle que l'on appelle couple de détente ; donc il ne contribue pas au développement du couple total produit par la machine mais il provoque des ondulations supplémentaires et engendre des vibrations ou du bruit acoustique indésirable dans l'arbre.

On applique le tenseur des contraintes de Maxwell sur une surface cylindrique située au milieu de l'entrefer entourant le rotor. Son expression est donnée par :

$$CT(\theta) = \frac{R^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} Br(r, \theta) \cdot B_\theta(r, \theta) \quad (2-15)$$

R : le rayon situé au niveau de l'entrefer.

L_u : la longueur utile de la machine.

μ_0 : perméabilité relative du vide.

2.5. Expression de la force électromotrice fem et couple d'interaction

2.5.1. Expression de la force électromotrice fem :

La force électromotrice est calculée partir de la variation de flux traversant une bobine en utilisant la loi de Faraday. Lorsque le rotor tourne d'un pas polaire, c'est-à dire de π/p un aimant Sud prend la place d'un aimant Nord et le flux ϕ dans la bobine s'inverse. Le flux produit par les aimants au niveau de l'encoche (i) s'obtient par intégration du potentiel vecteur magnétique comme suit :

$$\phi_i(t) = \frac{N_s L_u}{S} \int_{\theta_i - W/2}^{\theta_i + W/2} A. (r, \theta, t) r dr. d\theta \quad (2-16)$$

N_s : le nombre de spires par encoche.

S : la surface de l'encoche

L'expression de cette dernière est :

$$S = W \int_{R_1}^{R_2} r dr = \frac{W (R_2^2 - R_1^2)}{2} \quad (2-17)$$

La force électromotrice à vide est calculée par dérivation du flux créé par les aimants à travers les enroulements du stator comme suit :

$$E_{A,B,C}(t) = - \frac{d\Psi_{A,B,C}(t)}{dt} \quad (2-18)$$

2.5.2. Couple d'interaction :

On appelle "couple d'interaction électromagnétique" le terme du couple dû à l'interaction des courants statoriques et des aimants rotoriques. Le couple d'interaction développé par le type de machines étudiée peut être calculé par différentes méthodes à savoir :

- Tenseur des contraintes de Maxwell.

-A partir de la puissance instantanée.

-Loi de Laplace.

Le couple instantané est calculé en fonction de la puissance électromagnétique, or celle-ci s'exprime tout simplement par la somme de toutes les phases du produit de la force électromotrice par le courant de chaque phase. A vitesse de rotation constante, le couple électromagnétique peut s'écrire comme suit :

$$T_{em}(t) = \frac{P}{\Omega} \sum_{m=1}^3 E_m(t) \cdot i_m(t) \quad (2-19)$$

$E_m(t)$: la force électromotrice de la phase m et

$i_m(t)$: le courant.

Avec le couple instantané, nous pouvons calculer le coefficient d'ondulation tel que :

$$\Delta T_{em} = \frac{T_{em\max} - T_{em\min}}{T_{em\text{moyen}}} \cdot 100\% \quad (2-20)$$

où $T_{em\max}$, $T_{em\min}$ et $T_{em\text{moyen}}$ sont respectivement le couple maximum, le couple minimum et le couple moyen.

2.6. FEMM : Présentation de l'outil de calcul utilisé

2.6.1. Généralités sur le logiciel FEMM :

Le logiciel Finite Element Method Magnetics (FEMM) (Finite Element Method Magnetics) est un logiciel à éléments finis 2D cartésiens et 2D axisymétriques dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques, notamment en magnétostatique, dans le domaine des basses fréquences (fréquence industrielle). Il permet d'analyser et de simuler la distribution des champs magnétiques dans différents dispositifs électriques tels que les machines électriques, les transformateurs et les actionneurs électromagnétiques. Basé sur la méthode des éléments finis, FEMM offre des outils de modélisation, de maillage et de visualisation des résultats avec une bonne précision, ce qui en fait un logiciel largement utilisé dans la recherche scientifique, l'enseignement et l'étude des systèmes électromagnétiques.

2.6.2. Différentes étapes de simulation :

Dans cette simulation, nous choisissons un problème magnétique :

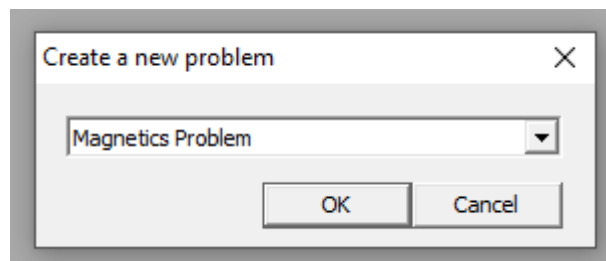


Figure 2-4 : créer un problème

Dans cette partie on va montrer les différentes options du logiciel FEMM :

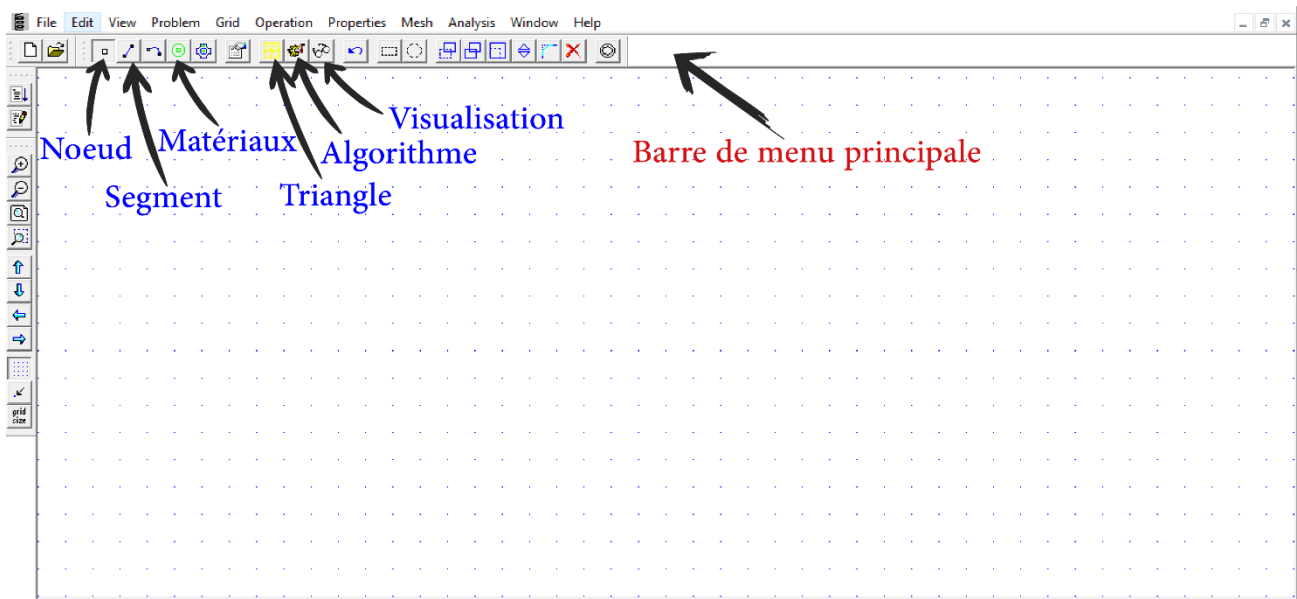


Figure 2-5 : Interface de FEMM

En utilisant les options du logiciel FEMM pour réaliser le schéma de la machine étudiée :

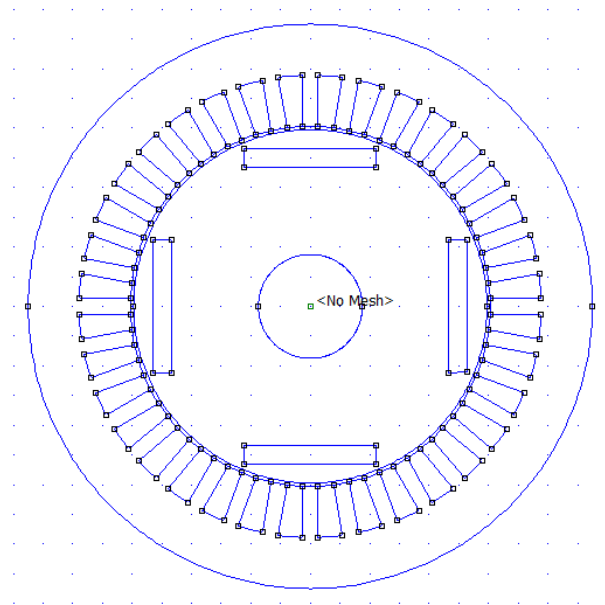


Figure 2-6 : Machine sans matériaux

Une fois le dessin de la machine terminé, il faut définir les matériaux utilisés dans la simulation. Pour ce faire, accédez au menu « Propriétés » puis à « Bibliothèque de matériaux », où s'affichent l'ensemble des matériaux disponibles :

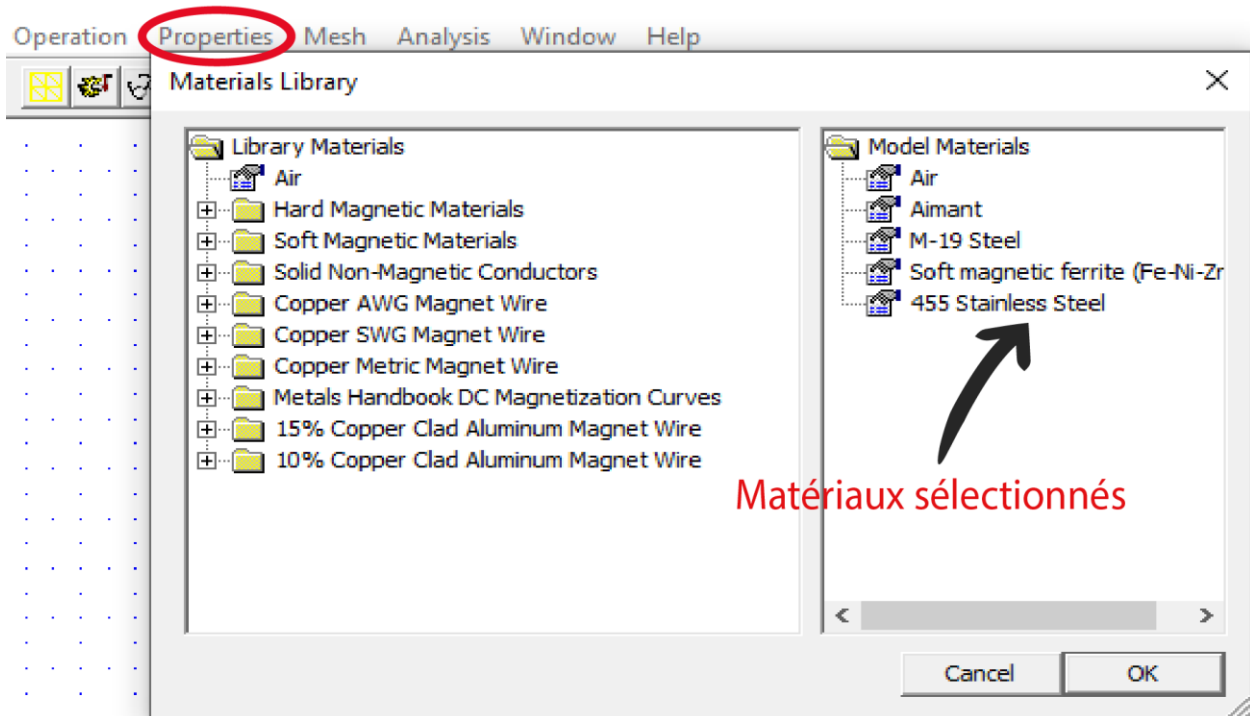


Figure 2-7 : Définition des propriétés des matériaux et milieux

Après cela, il reste à définir les propriétés des différentes régions. Pour ce faire, on sélectionne l'icône « Matériaux » puis on place un nœud à l'intérieur de chaque région à l'aide du bouton gauche de la souris. Ensuite, on sélectionne ce nœud avec le bouton droit, on appuie sur la touche Espace et on choisit le matériau correspondant dans le menu déroulant :

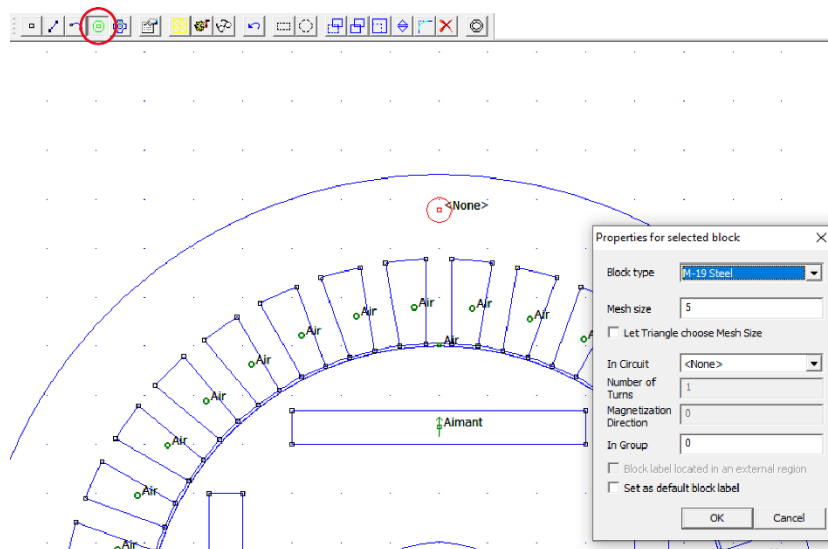


Figure 2-8 : Identification des matériaux

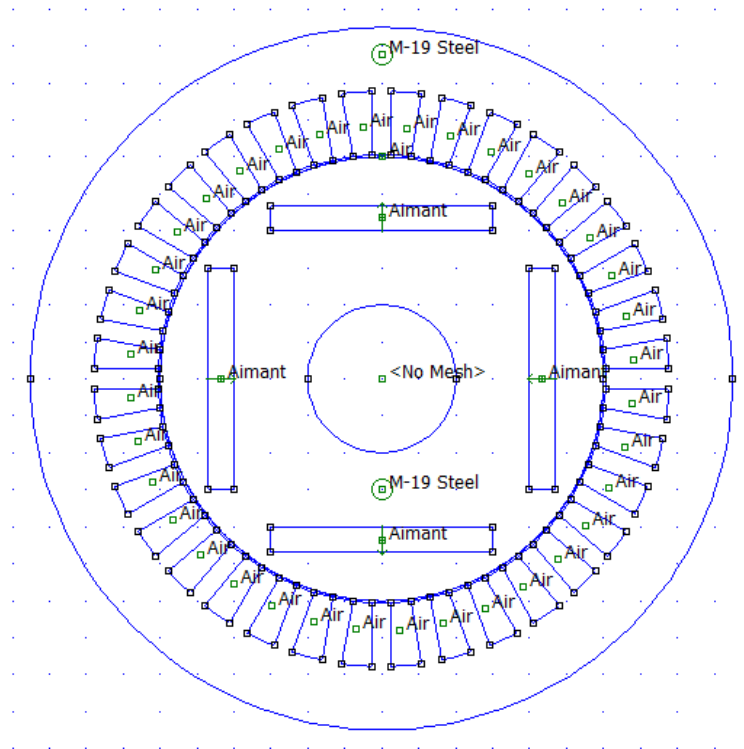


Figure 2-9 : Machine avec matériaux

2.6.3. Matériaux utilisés :

2.6.3.1. M-19 Steel :

M19 Steel est un acier électrique au silicium (3 à 4,5 % de Si) spécialement conçu pour les applications électromagnétiques telles que les transformateurs, les moteurs électriques et les générateurs.

L'ajout de silicium améliore fortement la perméabilité magnétique et réduit les pertes magnétiques, ce qui augmente le rendement énergétique. [18]

Principales caractéristiques :

- . Excellente perméabilité magnétique : facilite la circulation du flux magnétique.
- . Faibles pertes fer : réduit les pertes par hystérésis et courants de Foucault.
- . Bonne formabilité : peut être facilement découpé et façonné.
- . Résistivité électrique élevée : limite les courants parasites.

. Résistance mécanique modérée.

Composition chimique typique :

Silicium (Si) (3.0-4.5 %), Carbone (C) (0.05-0.15 %), Manganèse (Mn) (0.1-0.5 %)

Phosphore (P) ($\leq 0,03$ %), Soufre (S) ($\leq 0,01$ %), fer (fe) (reste)

Propriétés principales :

Tableau 2-1 : présente les propriétés principales de M-19 steel

Propriété	Valeur typique
Densité	7,65 g/cm ³
Résistance à la traction	350 – 450 MPa
Limite d'élasticité	200 – 300 MPa
Conductivité thermique	25 W/m·K
Température maximale de service	≈ 120 °C

Les avantages et les Inconvénients :

Tableau 2-2 : Avantages et inconvénients de M-19 steel

Les avantages	Les Inconvénients
Rendement énergétique élevé.	Plus coûteux que les aciers ordinaires.
Excellentes performances magnétiques	Fragilité plus élevée due à la présence de silicium.
Faibles pertes dans les circuits magnétiques	Résistance à la corrosion limitée sans protection.
Largement disponible et utilisé dans l'industrie électrique.	

Domaine d'application :

Noyaux de transformateurs, Moteurs électriques, Générateurs et alternateurs
Générateurs d'éoliennes.

2.6.3.2. 455 Stainless Steel :

455 Stainless Steel est un acier inoxydable martensitique durcissable par vieillissement, reconnu pour sa haute résistance mécanique, sa bonne résistance à la corrosion et sa bonne aptitude à la fabrication.

Il est largement utilisé dans les secteurs aéronautiques, automobile et médical. [18]

Principales caractéristiques :

- *Très haute résistance mécanique.*
- *Bonne résistance à la corrosion dans les environnements modérés.*
- *Bonne résistance à l'usure.*
- *Traitable thermiquement pour augmenter la dureté et la résistance.*
- *Bonne usinabilité et soudabilité avec précautions.*

Composition chimique typique :

Chrome (Cr) (15-17 %), Nickel (Ni) (4-6 %), Molybdène (Mo) (0.5-1.5 %)

Carbone (C) (0.05-0.15 %), Manganèse (Mn) (0.5-1%), Silicium (Si) (0.5-1%) fer (Fe) (reste).

Propriétés principales :

Tableau 2-3 : présente les propriétés principales de 455 stainless steel

Propriété	Valeur typique
Densité	7,75 g/cm ³
Résistance à la traction	860 – 1030 MPa
Limite d'élasticité	620 – 800 MPa
Conductivité thermique	25 W/m·K
Température maximale de service	≈ 600 °C

Les avantages et les Inconvénients :

Tableau 2-4: avantages et inconvénients de 455 stainless steel

Les avantages	Les Inconvénients
Excellente résistance mécanique.	Résistance à la corrosion inférieure à celle des aciers inoxydables austénitiques.
Bon rapport résistance/poids.	Sensible à la corrosion par piqûres en milieu chloré.
Bonne résistance à l'usure.	Nécessite des précautions lors du soudage.
Résistance correcte à la corrosion.	
Adapté aux applications à haute température.	

Domaine d'application :

- **Aéronautique : (Composants d'avions).**
- **Automobile : (Pièces moteur et transmission).**
- **Médical : (Instruments chirurgicaux).**
- **Industrie pétrolière : (Composants mécaniques).**

2.6.3.3. Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V):

Le Soft Magnetic Ferrite (Fe-Ni-Zn-V) est une ferrite magnétique douce composée principalement de fer (Fe), nickel (Ni), zinc (Zn) et parfois de faibles quantités de vanadium (V). Ce matériau céramique est largement utilisé dans les applications électromagnétiques à haute fréquence grâce à sa forte résistivité électrique et à ses faibles pertes magnétiques. [18]

Principales caractéristiques :

- *Très forte résistivité électrique limitant les courants de Foucault.*
- *Faibles pertes magnétiques à haute fréquence.*
- *Bonne perméabilité magnétique.*
- *Faible coercivité, facilitant l'aimantation et la désaimantation.*
- *Matériau léger et non conducteur.*

Composition chimique typique :

Oxyde de fer (Fe_2O_3) (60-75 %), Oxyde de nickel (NiO) (10-25 %)

Oxyde de zinc (ZnO) (5-20 %), Oxyde de vanadium (V_2O_5) (< 2 %)

Propriétés principales :

Tableau 2-5: présente les propriétés principales de soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)

Propriété	Valeur typique
Densité	4,8 – 5,2 g/cm ³
Résistance à la traction	30 – 80 MPa
Limite d'élasticité	Non définie (matériau céramique fragile)
Conductivité thermique	3 – 6 W/m·K
Température maximale de service	120 – 250 °C

Les avantages et les Inconvénients :

Tableau 2-6: avantages et inconvénients de soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)

Les avantages	Les Inconvénients
Excellentes performances aux hautes fréquences.	Fragile et cassant (nature céramique).
Très faibles pertes par courants de Foucault.	Induction de saturation plus faible que les aciers électriques.
Bonne stabilité thermique.	Sensible aux chocs mécaniques.
Faible consommation énergétique.	
Coût relativement faible.	

Domaine d'application :

- *Transformateurs haute fréquence.*
- *Antennes et filtres.*
- *Noyaux magnétiques.*
- *Suppresseurs de parasites EMI.*

Conclusion

En résumé, les méthodes de modélisation et l'outil de simulation FEMM présentés dans ce chapitre constituent le socle méthodologique de notre étude. Ils permettront d'évaluer avec précision les grandeurs clés de la machine telles que la f.e.m. et les différents couples indispensables à l'analyse de ses performances électromagnétiques.

Chapitre 03 :

Résultats et

Validations

3. Résultats et Validations

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus à partir des simulations électromagnétiques réalisées sous FEMM pour la machine synchrone à aimants permanents à rotor enterré multicouche (IPMSM). Après avoir établi le modèle de la machine et la méthodologie de simulation dans les chapitres précédents, l'objectif est ici d'évaluer l'influence des différents matériaux magnétiques utilisés sur les performances électromagnétiques de la machine.

3.1. La machine synchrone à aimants permanents internes (IPMSM) :

3.1.1. Définition :

La machine synchrone à aimants permanents internes (IPMSM) s'intègre de plus en plus aux applications des véhicules hybrides électriques (HEV) grâce à ses excellentes performances, son développement rapide et son faible impact environnemental. Dépendant des matériaux magnétiques à base de terres rares et de la structure du rotor pour ses caractéristiques dynamiques, elle est particulièrement utile dans les applications à grande vitesse, notamment pour les variateurs de vitesse.[19]

3.1.2. Caractéristiques :

L'IPMSM est un moteur synchrone dont les aimants sont insérés à l'intérieur du rotor, ce qui le protège de la force centrifuge et permet de très hautes vitesses de rotation. Cette configuration unique génère un double couple (magnétique et de réluctance), offrant une densité de puissance exceptionnelle et un rendement supérieur à 95 %. De plus, sa structure facilite le défluxage, une technique électronique qui élargit considérablement sa plage de vitesse. C'est la technologie phare des véhicules électriques actuels pour sa compacité, sa robustesse et son efficacité, malgré un coût de fabrication supérieur et un contrôle électronique complexe.

3.1.3. Pourquoi avons-nous choisi IPMSM ?

Nous avons choisi l'IPMSM plutôt que la MSAP classique, car elle offre un couple plus élevé grâce au couple de réluctance, un meilleur rendement, une large plage de vitesse par affaiblissement du flux et une meilleure protection des aimants. De plus, comme notre objectif est d'étudier l'influence des matériaux magnétiques sur les performances de la machine, l'IPMSM est la structure la plus adaptée pour mettre en évidence ces effets.

3.2. Caractéristiques de la machine étudiée :

Les caractéristiques de la machine :

Tableau 3-1: les caractéristiques de la machine

Dénomination	Désignation	Valeur [unité]
Aimantation rémanente des aimants	B_r	1.26 [T]
Perméabilité des aimants	μ_r	1
Nombres de conducteurs par encoche	N	1
Intensité nominale du courant par phase	I_n	116.688 A
Nombre d'encoches statoriques	Q_s	36
Ouverture de l'isthme d'encoche	w_1	5°
Nombre de paires de pôles	p	2
Rayon interne du fer rotorique	R_m	20.11 [mm]
Rayon externe du fer rotorique	R_0	60 [mm]
Rayon d'alésage	R_2	60.6 [mm]
Rayon externe de la machine	R_3	95 [mm]
Hauteur des encoches	H_e	17.02 [mm]
Longueur active	L_u	76 [mm]
Epaisseur des aimants	e_a	07 [mm]
Epaisseur de l'entrefer	e	0.6 [mm]

3.3. Perméabilité des matériaux :

3.3.1. Perméabilité de M-19 Steel :

Tableau 3-2: Perméabilité de M-19 Steel

Matériaux	Perméabilité relative	Pertes fer (W/kg à 1,5 T – 50 Hz)	Épaisseur (mm)
M19	$\approx 12000-14000$	1,2-1,8	0, 35-0,5
M27	$\approx 14000-16000$	1,1-1,6	0, 30-0,5
M36	$\approx 15000-18000$	1,0-1,5	0, 27-0,35

3.3.2. Perméabilité de 455 Stainless Steel :

Tableau 3-3: Perméabilité de 455 Stainless Steel

Condition (Traitement thermique)	Plage de perméabilité magnétique relative
Recuit de mise en solution (Solution Annealed)	1,5 – 2,0
H900 (Vieilli à 900 °F ≈ 482 °C)	3,0 – 5,0
H1000 (Vieilli à 1000 °F ≈ 538 °C)	2,0 – 4,0
H1100 (Vieilli à 1100 °F ≈ 593 °C)	1,8 – 3,5

3.3.3. Perméabilité de soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V) :

Remarque sur le Ferrite (Fe-Ni-Zn-V) : D'après la courbe B-H introduite dans le logiciel FEMM pour ce matériau spécifique, la perméabilité magnétique relative constante ou initiale est égale à $\mu_r = 1$. Cela signifie que du point de vue magnétique, ce matériau se comporte comme l'air ($\mu_r = \mu_0$), tout en conservant ses propriétés électriques isolantes ($\sigma = 0$ MS/m).

Block Property

Name: Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)

B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative μ_x : 1 Relative μ_y : 1

ϕ_{hx} , deg: 0 ϕ_{hy} , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity

H_c , A/m: 0

Electrical Conductivity

σ , MS/m: 0

Source Current Density

J, MA/m²: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

Lam thickness, mm: 0 Lam fill factor: 1

Number of strands: 0 Strand dia, mm: 0

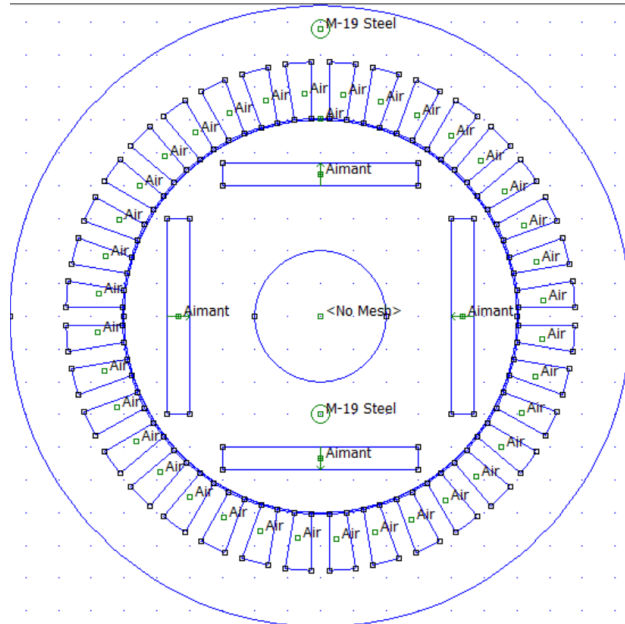
OK Cancel

Figure 3-1 : Fenêtre des propriétés du Ferrite (Fe-Ni-Zn-V) sous FEMM

3.4. Résultats de simulation :

3.4.1. A vide :

M-19 Steel



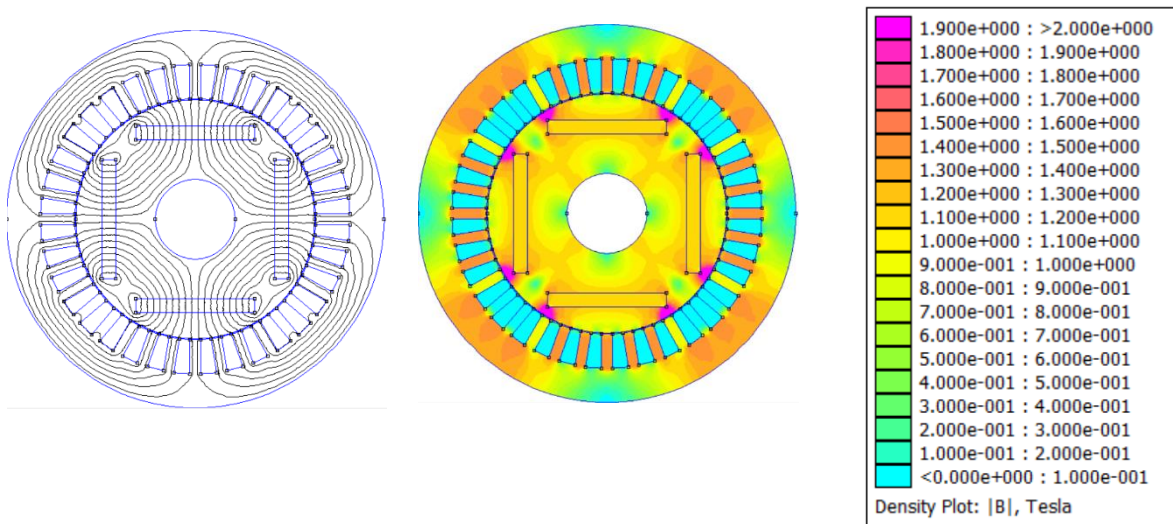
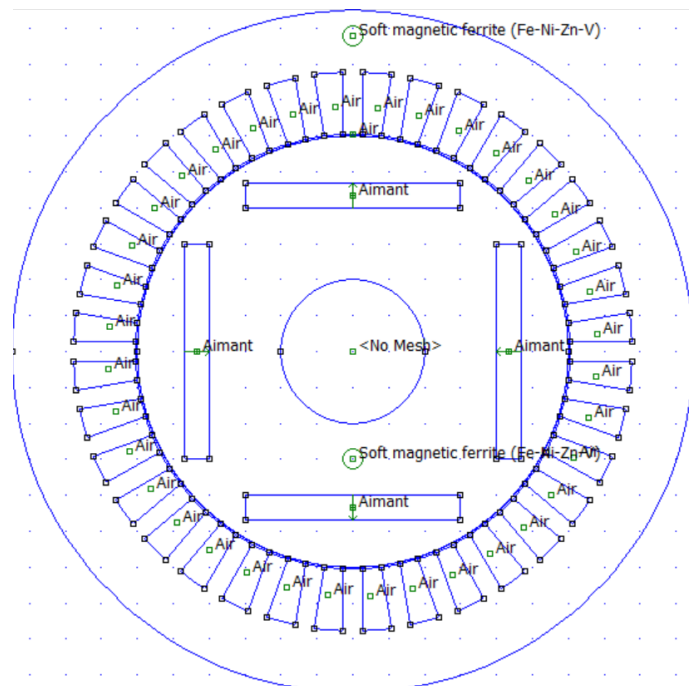


Figure 3-2 : La géométrie de la machine en utilisant le matériau M-19 Steel

Commentaire : On observe une excellente canalisation des lignes de champ à travers le stator et le rotor. Les zones orange et rouges montrent que le matériau travaille efficacement dans des zones de forte induction (autour de 1,4 à 1,6T), notamment dans les dents du stator, sans pour autant tomber dans une saturation excessive généralisée.

Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)



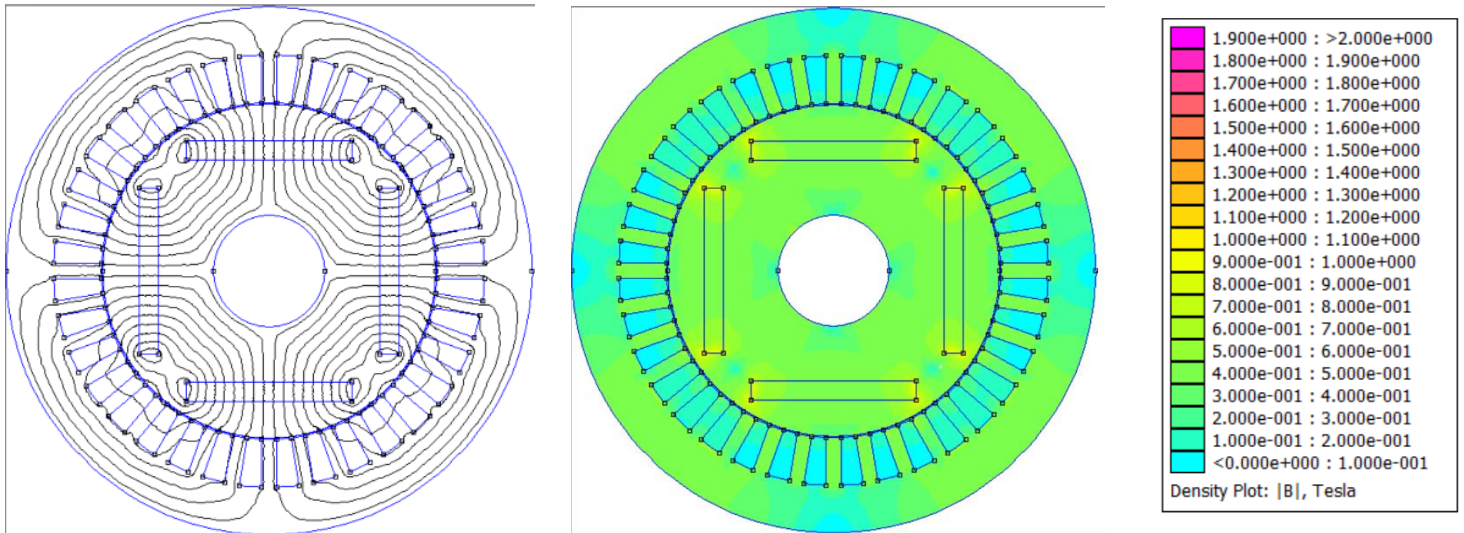
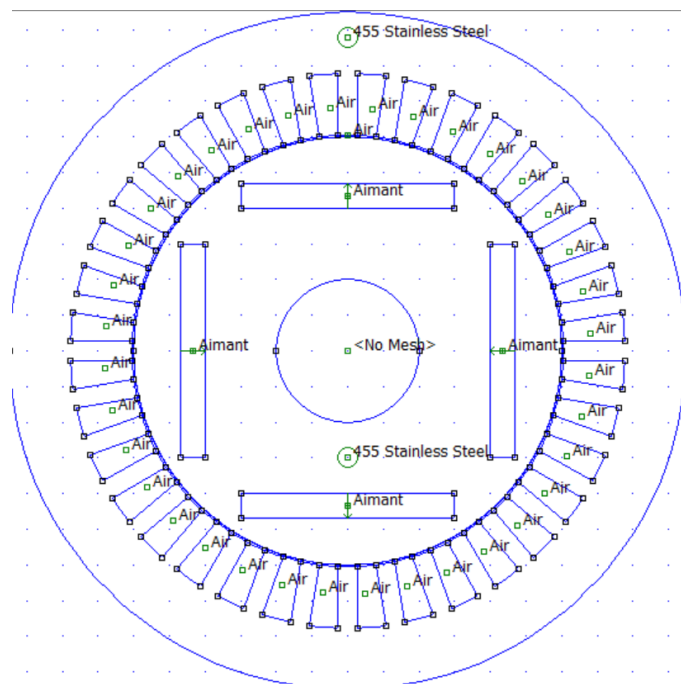


Figure 3-3 : La géométrie de la machine en utilisant le matériau Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)

Commentaire : La cartographie est majoritairement verte et bleue, ce qui indique des niveaux d'induction très faibles (généralement en dessous de 0,6T). Les lignes de flux peinent à se concentrer efficacement dans le circuit.

455 Stainless Steel



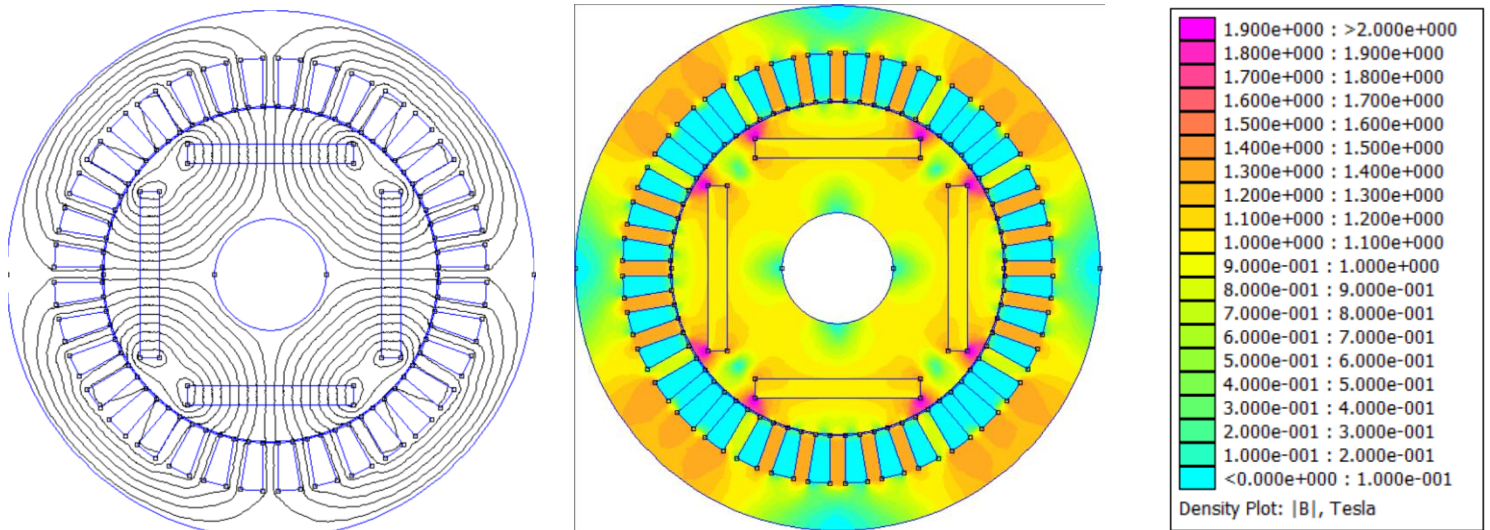


Figure 3-4 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau 455 Stainless Steel

Commentaire : On remarque l'apparition de points chauds critiques (zones roses/violettes dépassant les 1,9T) aux extrémités des aimants permanents. Cela traduit une forte saturation locale et une reluctance élevée du circuit, ce qui entraîne d'importantes pertes fer (pertes par hystérésis et courants de Foucault) si le flux est alternatif.

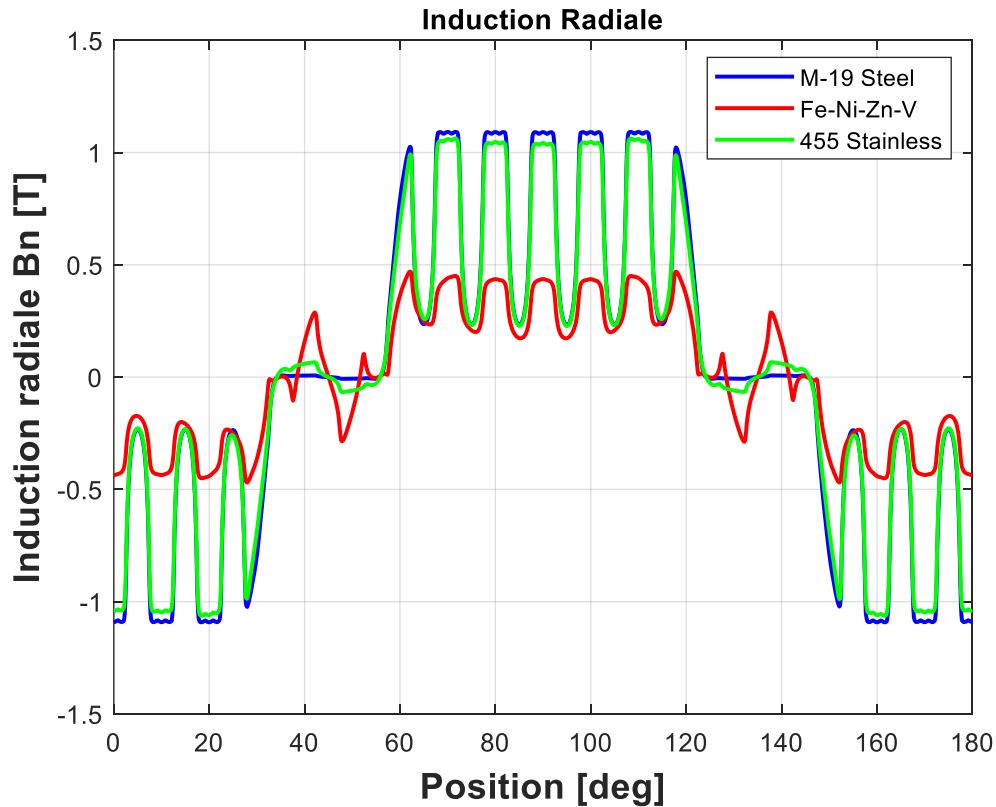


Figure 3-5 : Induction radiale B_n (T)

Commentaire : Ce graphique montre la composante radiale de la densité de flux magnétique, L'acier électrique M-19 (courbe bleue) et l'acier inoxydable 455 Stainless (courbe verte) affichent des performances presque identiques et optimales, atteignant un plateau d'induction maximal autour de 1,1 T. Les oscillations régulières correspondent au passage devant les encoches du stator (effet d'encochage).

En revanche, la ferrite Fe-Ni-Zn-V (courbe rouge) s'effondre littéralement, peinant à dépasser 0,45 T, ce qui confirme sa faible contribution magnétique.

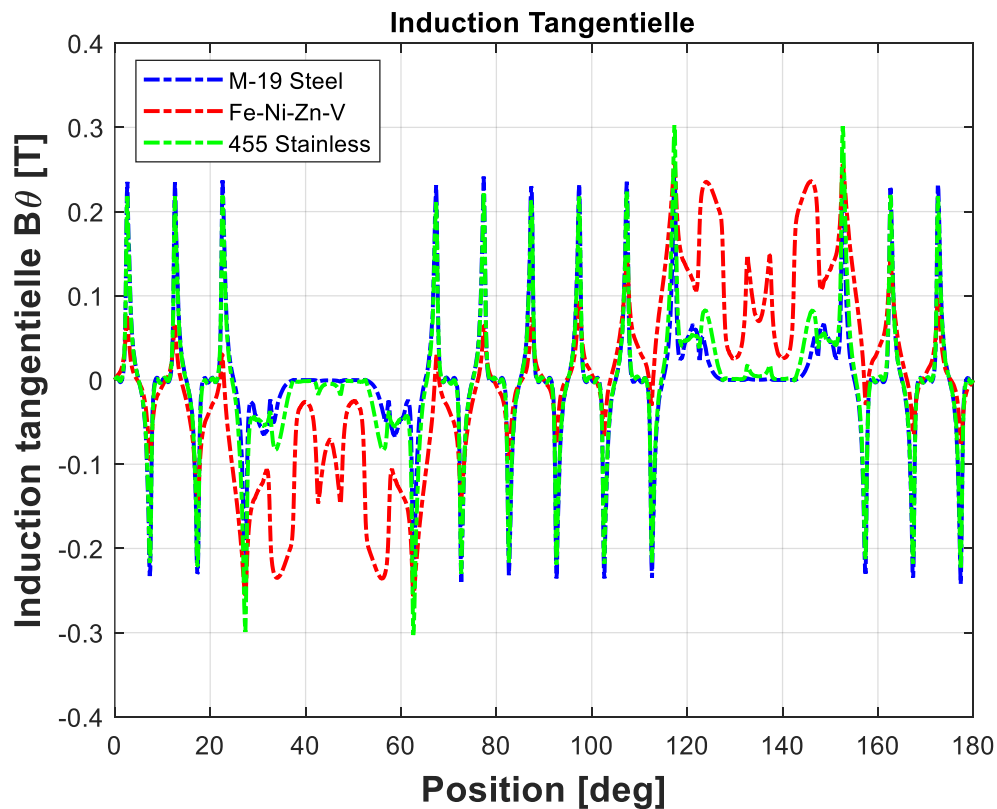


Figure 3-6 : Induction tangentielle B_θ (T)

Commentaire : Ce graphique montre la composante tangentielle de flux magnétique, On observe de fortes pointes d'induction (jusqu'à 0,3T) pour le M-19 et le 455 Stainless, localisées au niveau des transitions géométriques et des dents du stator.

La courbe de la ferrite Fe-Ni-Zn-V (courbe rouge) est très bruitée, asymétrique et déphasée par rapport aux deux autres, traduisant une mauvaise distribution spatiale du flux et des distorsions harmoniques importantes.

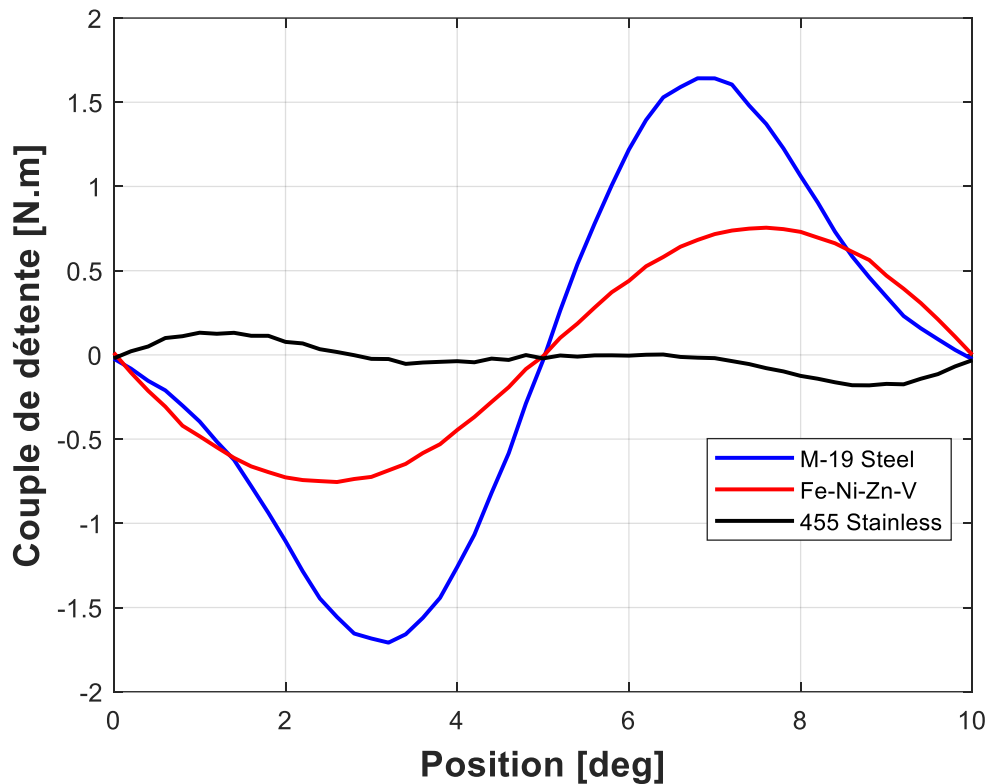


Figure 3-7 : couple de détente (N.M)

Commentaire : Ce graphique montre Le couple de détente :

Le M-19 Steel présente l'amplitude de couple de détente la plus élevée (crête à près de 1,7 N.m), ce qui induira des pulsations de couple notables à basse vitesse.

Le 455 Stainless (courbe noire) affiche un couple de détente quasiment nul (proche de 0 N.m). Cela s'explique par sa saturation locale élevée constatée lors des FEA précédentes, qui lisse les transitions magnétiques à l'entrée des dents.

La ferrite Fe-Ni-Zn-V se situe au milieu (environ 0,75 N.m).

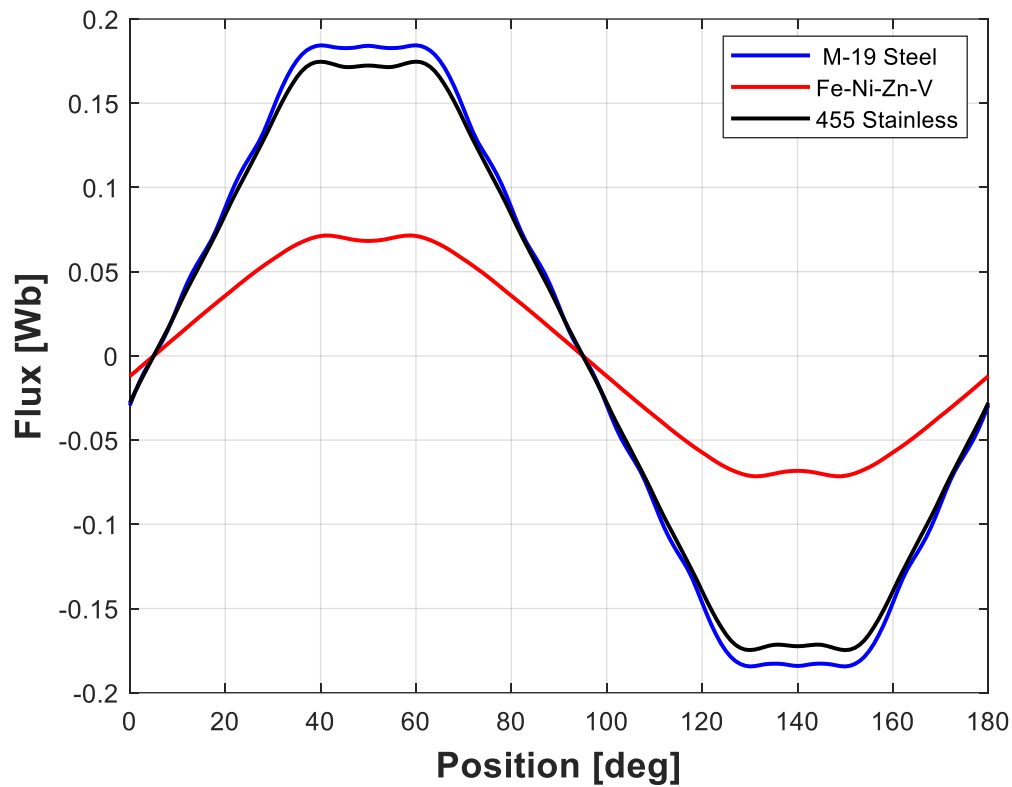


Figure 3-8 : Flux (Wb)

Commentaire : Ce graphique illustre l'évolution du flux magnétique, L'allure est proprement alternative (sinusoïdale à sommet plat). L'acier M-19 capte le flux maximal le plus élevé ($\approx 0,18$ Wb), suivi de très près par l'acier 455 Stainless ($\approx 0,17$ Wb).

La ferrite Fe-Ni-Zn-V n'atteint même pas la moitié de cette valeur ($\approx 0,07$ Wb), pénalisant grandement la capacité de la machine à développer une puissance massique décente.

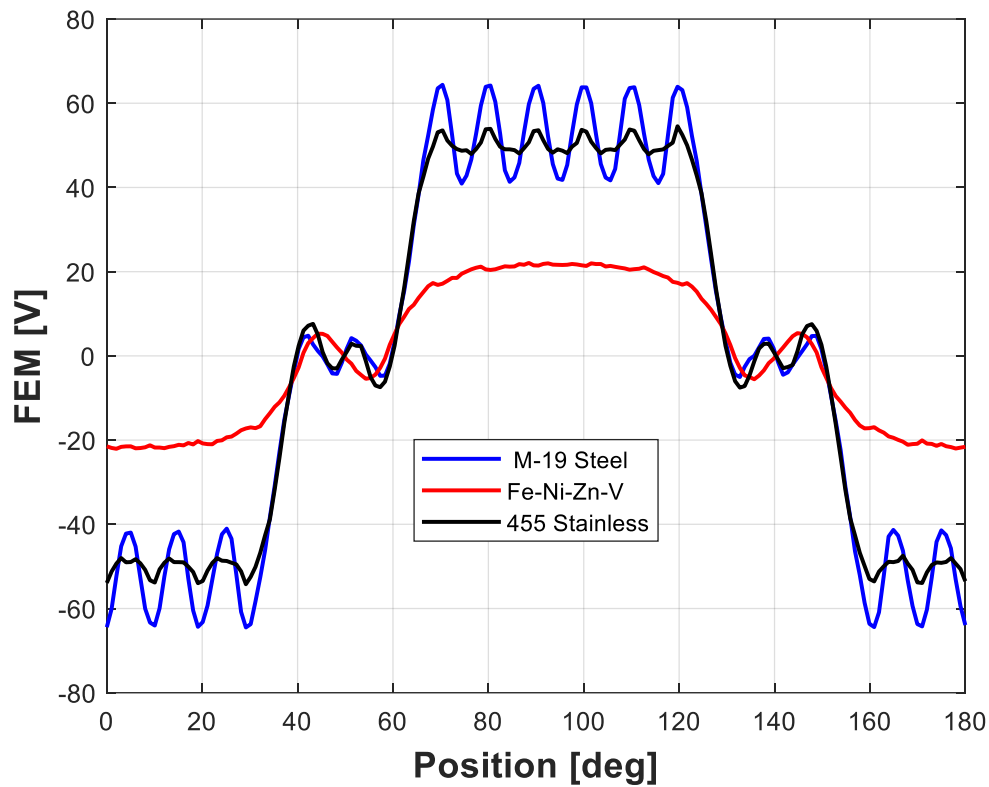


Figure 3-9 : Fem (V)

Commentaire : Concordant avec les résultats du flux, le M-19 Steel induit la tension à vide la plus élevée (pics à ~65 V), suivi par le 455 Stainless (pics à ~55 V). La forme d'onde du 455 Stainless est d'ailleurs plus "lisse" au sommet (moins d'harmoniques d'encochage), ce qui corrobore son faible couple de détente.

La ferrite Fe-Ni-Zn-V plafonne péniblement à 20 V avec un signal très aplati, inadapté pour une application industrielle performante.

3.4.2. En charge :

M-19 Steel

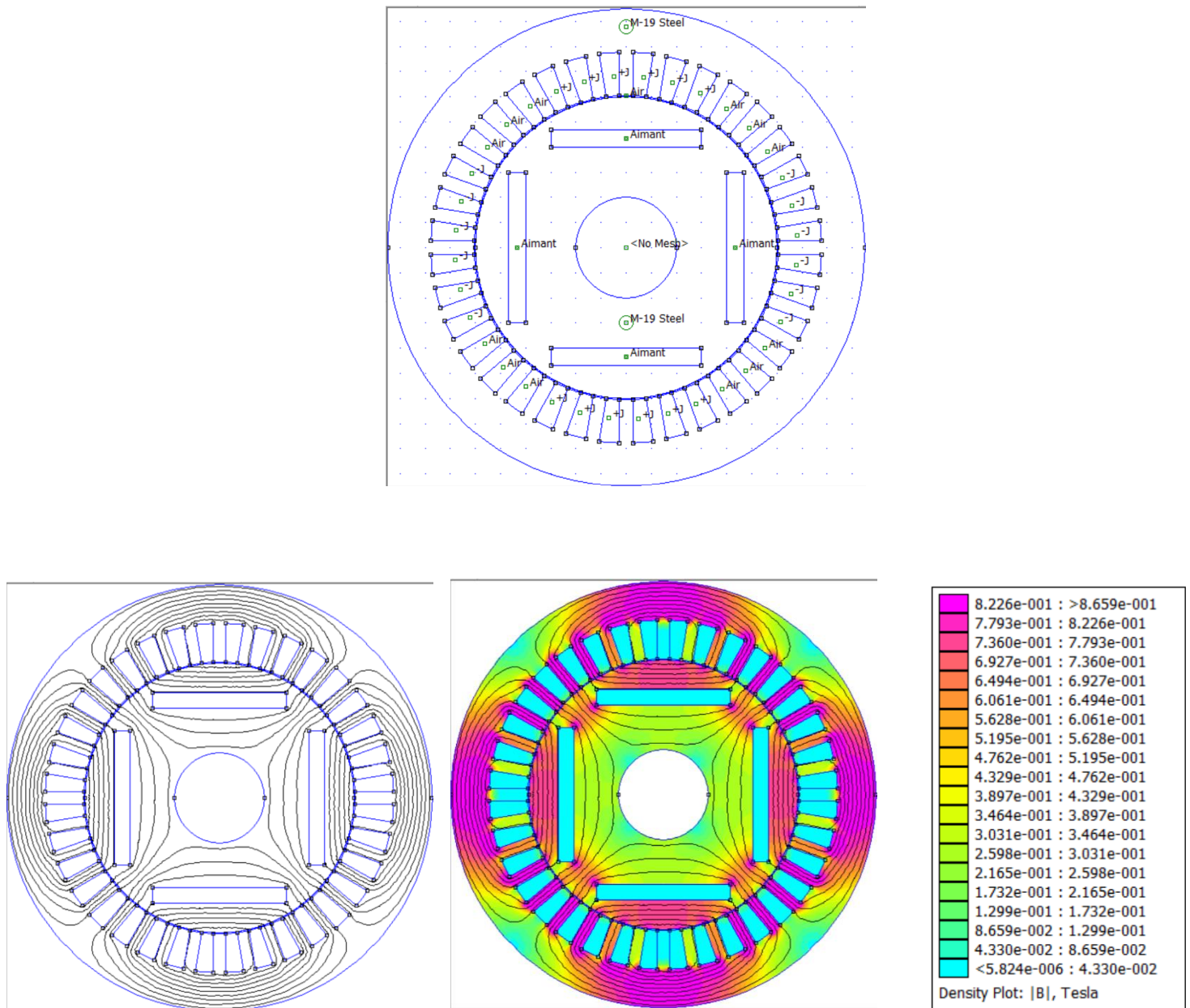


Figure 3-10 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau M-19 Steel (en charge)

Commentaire : On remarque une saturation très prononcée (zones violettes et roses) sur toute la périphérie extérieure de la culasse du stator et au niveau des dents orientées sur les axes principaux. Le flux issu du rotor se déploie largement et de manière très dense à travers l'entrefer. Les lignes de champ sont parfaitement dessinées, continues et régulières, ce qui témoigne de l'excellente perméabilité magnétique de cet acier électrique.

Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)

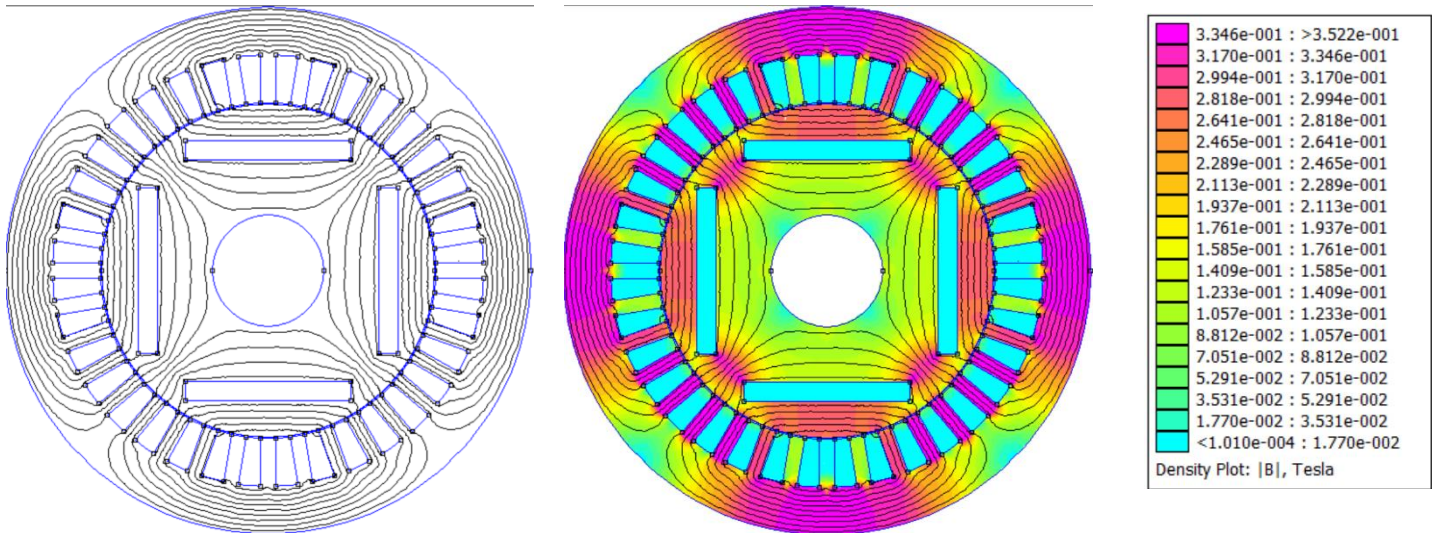
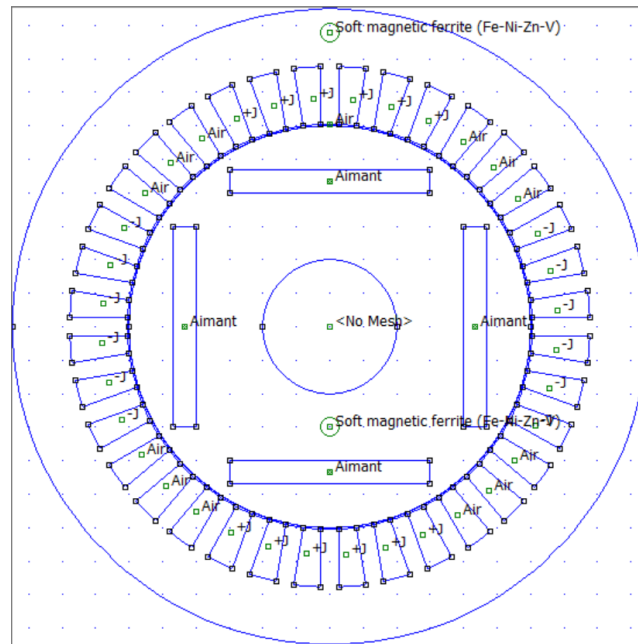


Figure 3-11 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)
(en charge)

Commentaire : Visuellement, la cartographie présente des couleurs similaires à l'acier (violet sur la culasse), mais cela est uniquement dû au changement d'échelle automatique de la simulation. En réalité, le matériau sature à un niveau de flux extrêmement bas. Les lignes de champ au centre du rotor sont très espacées et peinent à se concentrer, car la ferrite offre une résistance (réductance) beaucoup plus élevée.

455 Stainless Steel

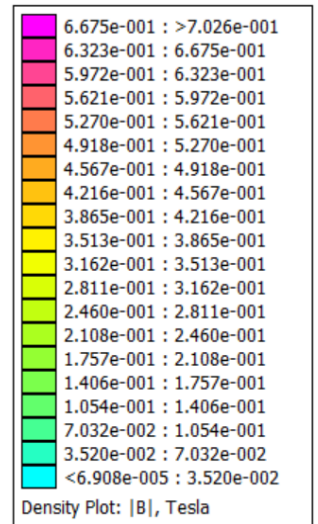
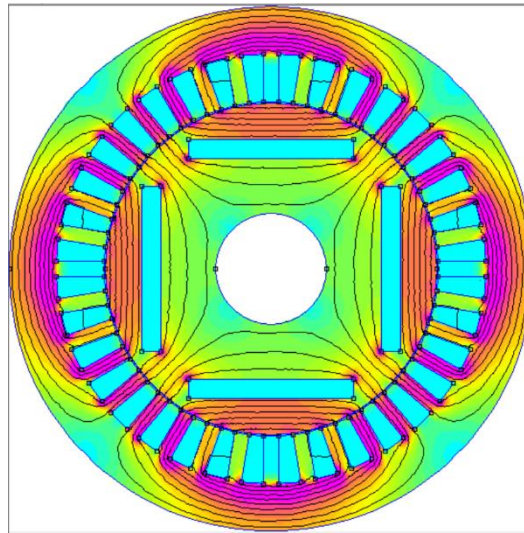
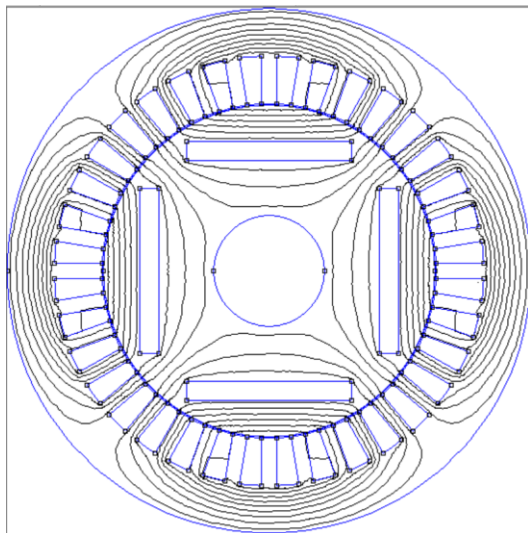
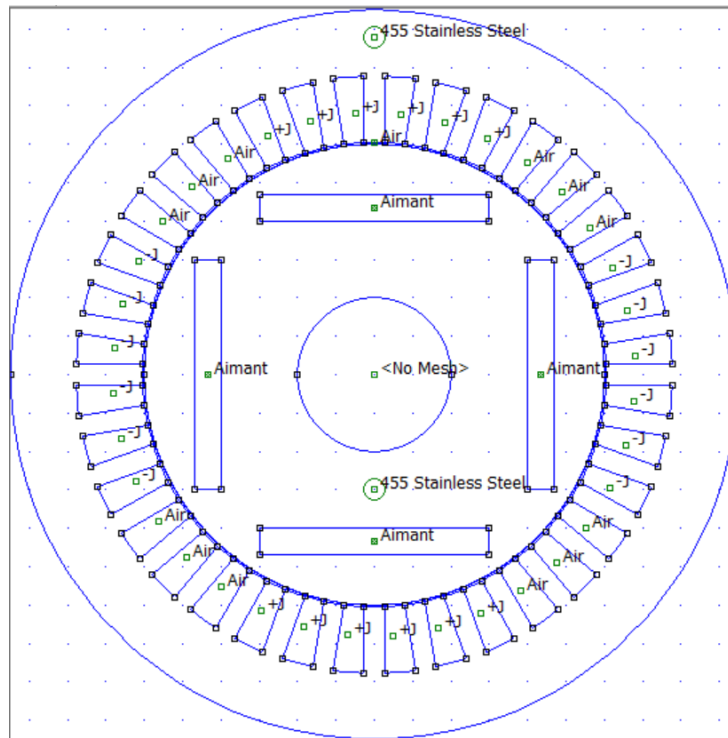


Figure 3-12 : la géométrie de la machine en utilisant le matériau 455 Stainless Steel (en charge)

Commentaire : On observe une distribution intermédiaire. Les zones de forte concentration de flux (violettes) entourent la culasse extérieure, mais elles s'estompent plus rapidement dans les dents du stator (qui restent bleues/vertes claires, soit environ 0,2 à 0,3 T). Les lignes de flux montrent une distribution moins homogène à la traversée de l'entrefer par rapport au M-19.

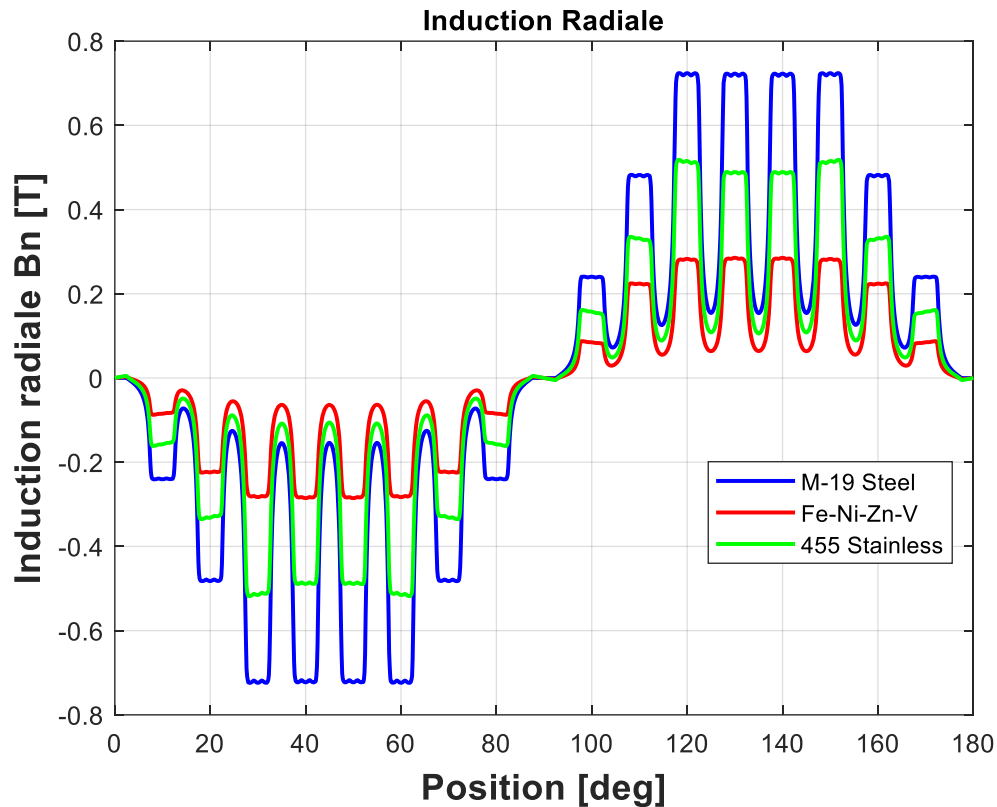


Figure 3-13 : induction radiale $B_n(T)$

Commentaire : Le M-19 Steel (courbe bleue) domine nettement l'entrefer avec un profil en créneau bien défini atteignant un plateau maximal de 0,72T. Les encoches du stator provoquent des chutes d'induction régulières et nettes. Le 455 Stainless (courbe verte) conserve une allure similaire mais subit une baisse d'amplitude globale, plafonnant à un maximum de 0,5 T sur ses paliers. La ferrite Fe-Ni-Zn-V (courbe rouge) reste très limitée et peine à franchir la barre des 0,28 T, confirmant une capacité d'excitation dans l'entrefer très restreinte.

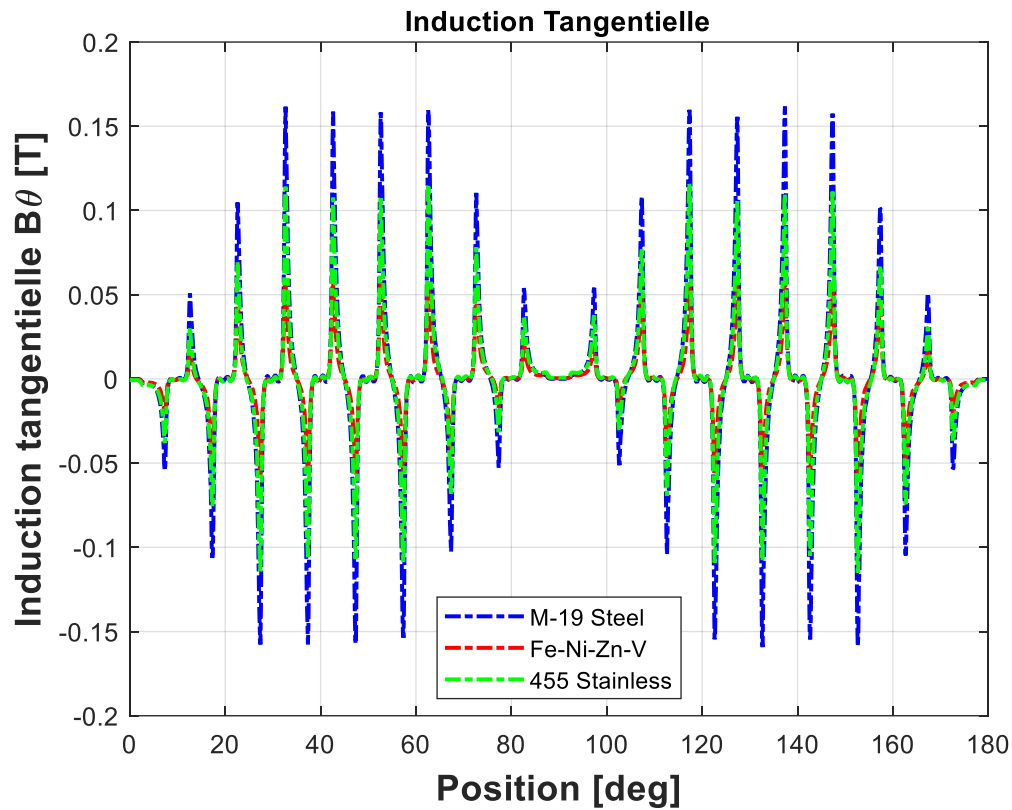


Figure 3-14 : induction tangentielle B_θ (T)

Commentaire : 'allure générale est extrêmement symétrique et régulière pour les trois matériaux, ce qui indique un alignement propre ou une absence de distorsions de charge asymétriques sur cette mesure. Le M-19 Steel présente les pointes d'induction les plus acérées, grimpant jusqu'à 0,16T. Le 455 Stainless suit la même dynamique géométrique avec des pics légèrement atténués à 0,11 T. La ferrite Fe-Ni-Zn-V affiche les impulsions les plus faibles, écrasées sous la barre des 0,05 T, traduisant à nouveau la faible énergie magnétique injectée dans l'entrefer.

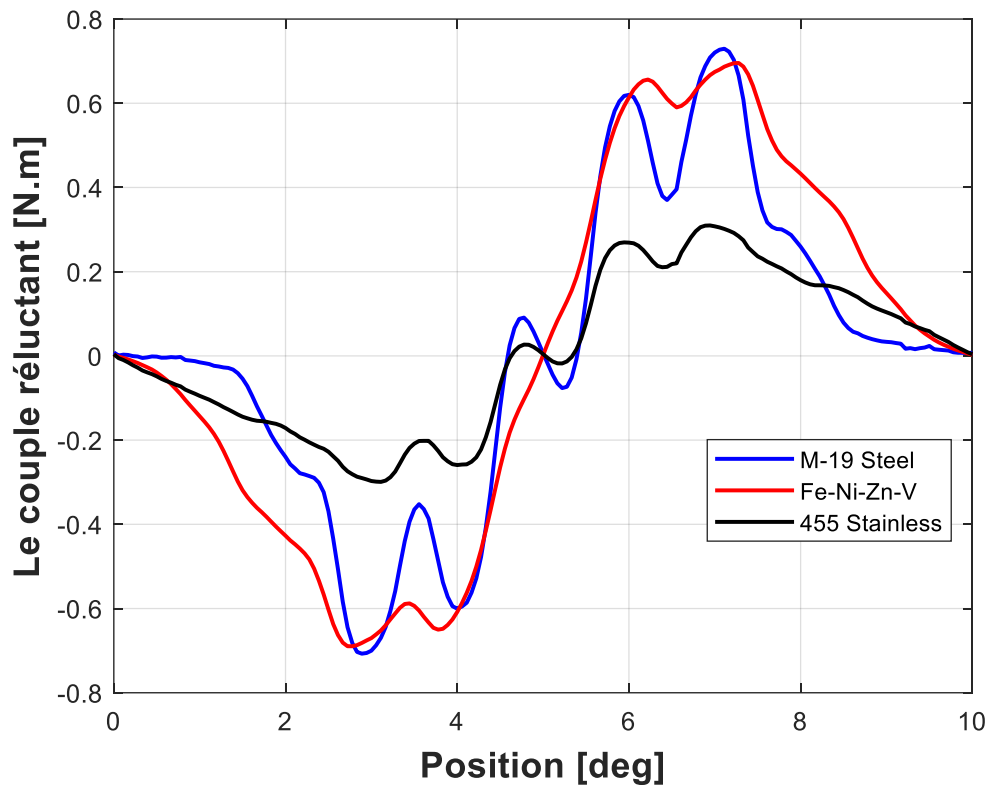


Figure 3-15 : Le couple réductant (N.m)

Commentaire : L'acier M-19 Steel (courbe bleue) et la ferrite Fe-Ni-Zn-V (courbe rouge) présentent les amplitudes de couple réductant les plus élevées, oscillant entre environ -0,7 N.m et +0,73 N.m. Leurs profils sont très proches en termes de pics, ce qui indique que malgré la faible induction de la ferrite, la variation géométrique de sa réluctance reste abrupte. L'acier inoxydable 455 Stainless (courbe noire) lisse considérablement le phénomène. Son amplitude est divisée par plus de deux, oscillant mollement entre -0,3 N.m et +0,3 N.m.

Sa forte saturation locale amortit les variations brutales de réluctance au passage des pôles.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre permettra de mettre en évidence l'impact des différents matériaux magnétiques sur le comportement électromagnétique de la machine IPMSM. L'analyse des résultats issus des simulations FEMM fournira une évaluation comparative de la distribution du flux magnétique, de la densité de flux et du couple électromagnétique, afin d'identifier le matériau le plus adapté à l'amélioration des performances de la machine. Ces résultats constitueront également une base essentielle pour la validation du modèle et l'interprétation des performances obtenues.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence des matériaux magnétiques sur les performances d'une machine synchrone à aimants permanents à rotor enterré multicouche (IPMSM). Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel FEMM, basé sur la méthode des éléments finis, permettant d'analyser avec précision le comportement électromagnétique de la machine.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a permis de présenter les principes fondamentaux des matériaux magnétiques ainsi que les caractéristiques et les domaines d'application des machines synchrones à aimants permanents. Les différents types de matériaux magnétiques et leurs propriétés ont été examinés afin de mettre en évidence leur rôle déterminant dans les performances des machines électriques.

Par la suite, les méthodes de modélisation électromagnétique ainsi que les équations régissant le fonctionnement de la machine ont été présentées. Une attention particulière a été accordée à la méthode des éléments finis et à l'environnement de simulation FEMM, qui a servi d'outil principal pour l'évaluation des performances de la machine étudiée.

Enfin, les résultats des simulations ont permis de comparer les comportements électromagnétiques de trois matériaux : **M-19 Steel**, **455 Stainless Steel** et **Soft Magnetic Ferrite (Fe-Ni-Zn-V)**. L'analyse des distributions du flux magnétique, des densités de flux radiale et tangentielle, du flux total, de la force électromotrice ainsi que des couples de détente et de réluctance a montré que le **M-19 Steel** offre les meilleures performances globales grâce à sa forte perméabilité magnétique et à sa capacité à canaliser efficacement le flux magnétique. Le **455 Stainless Steel** présente des performances intermédiaires mais reste limité par des phénomènes de saturation locale. Quant à la **ferrite magnétique douce Fe-Ni-Zn-V**, ses faibles niveaux d'induction magnétique conduisent à des performances nettement inférieures pour cette application.

Les résultats obtenus confirment ainsi l'importance du choix du matériau magnétique dans la conception des machines électriques et démontrent que le **M-19 Steel** constitue le matériau le plus adapté parmi ceux étudiés pour améliorer les performances électromagnétiques de la machine IPMSM.

Comme perspective, ce travail pourrait être approfondi par l'étude d'autres matériaux magnétiques avancés, la prise en compte des pertes fer et thermiques, ainsi que l'optimisation géométrique de la machine afin d'améliorer davantage son rendement, sa densité de puissance et ses performances globales en fonctionnement réel.

Références

- [1] Pérez, J. P., Carles, R., Fleckinger, R., & Lagoute, C. (2001). *Electromagnétisme: fondements et applications* (Vol. 4). Dunod
- [2] Techniques de l'Ingénieur, *Réseaux électriques – Matériaux magnétiques : propriétés*, Chapitre II, Éditions T.I.
- [3] J. Niar, J. C. Gallois, M. Ybilensky, et J. P. Libersac, *Électricité, machines électriques et électronique*, Éditions Nathan, Paris.
- [4] K. Aid et M. Akrou, "Calcul et optimisation d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2015.
- [5] B. Benerjee et P. MacCler, "Barriers Towards Successful Technology Transfer and Commercialization of Energy Efficient Advanced Motor and Drives", dans A. Almeida et al. (eds), *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*, Springer, Berlin, pp. 321-336.
- [6] B. Boukais, "Contribution à la modélisation des systèmes couplés machines-convertisseurs : application aux machines à aimants permanents (BDCM - PMSM)", Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Février 2012.
- [7] S. Mouzaoui, "Étude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de Défauts de Courts-Circuits et de Désaimantations par la Méthode des Éléments Finis", Mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger.
- [8] M. Rossi, "Conception optimale et multi-physique de composants passifs de puissance exploités dans le domaine ferroviaire", Thèse de Doctorat, Université de Lille, Décembre 2012.
- [9] A. Aimeur et H. Bennouioua, "Dimensionnement optimal d'une machine synchrone à aimants permanents à double excitation", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2018.
- [10] B. Ladghem Chikouche, "Calcul des performances de la machine synchrone à aimants permanents", Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, Juillet 2009.
- [11] B. Nedjar, "Modélisation basée sur la méthode des réseaux de perméances en vue de l'optimisation de machines synchrones à simple et à double excitation", Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan (ENS Cachan), Mars 2012.
- [12] H. Dogan, "Méthodologie de conception des machines synchrones à aimants permanents – Application au véhicule électrique avec chargeur rapide embarqué", Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, Juillet 2013.
- [13] K. Boughrara, "Modélisation analytique et numérique des performances électromagnétiques des moteurs synchrones à aimants permanents", Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, Décembre 2008.
- [14] H. Bekkouche et O. Achour, "Calcul des performances des machines synchrones à aimants permanents montés sur la surface rotorique non magnétique", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2019.

- [15] Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield, et D. Howe, "Improved analytical modelling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets", *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 151, no. 6, pp. 641-650, 2004.
- [16] Y. Amara, "Modélisation pour le dimensionnement des machines électriques. Application à des machines spéciales", Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université du Havre, 2012.
- [17] Techniques de l'Ingénieur, "Propriétés métallurgiques et magnétiques des aciers", Fiche technique, Éditions Métal Zénith.
- [18] M. A. H. Raihan, K. J. Smith, A. A. Almoraya, et F. Khan, "Design and Analysis of Advanced Permanent Magnet Synchronous Machines", *School of Electrical and Electronic Engineering*, Newcastle University / Military Institute of Science & Technology, 2020.