

# Conception et analyse d'une machine à engrenage magnétique axial

par

Essossinam Frédéric ALOEYI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 12 SEPTEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

© Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Qingsong Wang, directeur de mémoire  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Ambrish Chandra, président du jury  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Maarouf Saad, membre du jury  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 07 SEPTEMBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Ce présent mémoire est réalisé dans le groupe de recherche en électronique de puissance et commande industrielle (GRÉPCI).

Je tiens tout d'abord à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le Professeur Qingsong Wang pour l'opportunité qu'il m'accorde et le suivi irréprochable dont il a fait preuve tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je souhaite également remercier mon collègue Aran Shoaie pour ses nombreux conseils et son soutien. J'ai beaucoup appris auprès de lui.

Je remercie les membres du jury d'avoir aménagé un temps pour évaluer ce mémoire. Je remercie aussi tout le corps professoral et administratif de l'ETS pour la qualité de la formation reçue.

Mes sincères remerciements iront également à mon père, ma mère et ma sœur pour le soutien indéfectible dont ils font preuve durant les bons et les mauvais moments de ma vie. Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude.

Pour finir, je tiens à adresser mes sincères remerciements à celle qui partage mon cœur pour le soutien et l'amour inconditionnel dont elle fait preuve. Elle me donne la force de me surpasser jour après jour.



# Conception et analyse d'une machine à engrenage magnétique axial

Essossinam Frédéric Aloeyi

## RÉSUMÉ

Dans le souci de transférer de la puissance d'une façon efficace et fiable vers une charge et de résoudre les contraintes de poids et de coût rencontrés par les systèmes à entraînement direct, une nouvelle configuration de machine à engrenage magnétique axial est présentée. L'objectif principal de cette recherche est de concevoir une machine à engrenage magnétique qui permet d'atteindre une densité de couple élevée, tout en présentant une faible ondulation de couple et un volume optimal d'aimants permanents utilisés. Pour atteindre cet objectif, une collecte de données à partir des sources existantes est effectuée. Ces données sont ensuite analysées en utilisant des matrices afin d'extraire les informations pertinentes. Par la suite, le logiciel Ansys Maxwell est utilisé pour faire la conception de la machine proposée tout en optimisant les paramètres clés de conception grâce à la méthode par balayage de paramètres. Le modèle optimisé est analysé par éléments finis en 2D et en 3D. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, car la machine proposée permet d'atteindre une densité de couple élevée, un couple par unité de volume d'aimants permanents élevés et une faible ondulation de couple respectivement de  $110.26 \text{ kNm/m}^3$ ,  $492.81 \text{ kNm/m}^3$  et de 1.33 %. La machine conçue est adaptée au domaine des véhicules électriques.

**Mots-clés :** machine à engrenage magnétique, analyse par éléments finis 2D et 3D, couplage axial, focalisation de flux, réseau halbach





## **Design and analysis of an axial magnetically geared machine**

Essossinam Frédéric ALOEYI

### **ABSTRACT**

With the aim of transferring power efficiently and reliably to a load and solving the weight and cost constraints encountered by direct drive systems, a new axial magnetically geared machine configuration is presented. The main objective of this research is to design a magnetic gear machine that achieves high torque density with low torque ripple and optimal volume of permanent magnets used. To achieve this objective, data is collected from existing sources. This data is then analyzed using matrices to extract the relevant information. Subsequently, Ansys Maxwell software is used to design the proposed machine while optimizing the key design parameters using the parameter sweep method. The optimized model is analyzed by finite elements in 2D and 3D. The results obtained are very satisfactory as the proposed machine achieves high torque density, high torque per unit volume of permanent magnets and low torque ripples of  $110.26 \text{ kNm/m}^3$ ,  $492.81 \text{ kNm/m}^3$  and  $1.33 \%$  respectively. The machine designed is suitable for electric vehicles.

**Keywords:** magnetically geared machine, 2D and 3D finite element analysis, axial coupling, flux focusing, halbach array



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Historique rapide de l'engrenage magnétique .....	5
1.2 Topologie des engrenages magnétiques.....	6
1.2.1 Engrenages magnétiques conventionnels non modulés.....	6
1.2.2 Engrenages magnétiques modulés .....	8
1.2.2.1 Engrenage magnétique coaxial à flux radial.....	9
1.2.2.2 Engrenage magnétique coaxial à flux axial .....	9
1.2.2.3 Engrenage magnétique coaxial à flux transversal.....	10
1.2.2.4 Engrenage magnétique coaxial avec des aimants permanents montés en surface.....	11
1.2.2.5 Engrenage magnétique coaxial à aimants permanents intérieur	12
1.2.2.6 Engrenage magnétique coaxial à focalisation de flux.....	14
1.2.2.7 Engrenage magnétique coaxial Halbach.....	16
1.2.2.8 Engrenage magnétique coaxial à réluctance .....	17
1.3 Machine à engrenages magnétique .....	18
1.3.1 Machine à engrenage magnétique à trois entrefers.....	19
1.3.2 Machine à engrenage magnétique à deux entrefers .....	20
1.3.2.1 Pseudo Machines .....	20
1.3.2.2 Machines à engrenages magnétiques à bobinage.....	22
1.3.2.3 Machines à engrenage magnétique à stator partitionné .....	23
1.3.3 Machine à engrenage magnétique à entrefer unique.....	25
1.3.3.1 Machines à Vernier .....	25
1.3.3.2 Machines à commutation de flux.....	26
1.3.3.3 Machine à inversion de flux.....	26
1.4 État général des différents types d'engrenages magnétiques coaxiaux .....	27
1.5 État général des machines à engrenage magnétiques.....	30
1.6 Conclusion de la revue de littérature .....	32
CHAPITRE 2 FONDEMENTS MATHÉMATIQUES ET MÉTHODOLOGIE DE RÉSOLUTION .....	33
2.1 Fondements mathématiques de l'engrenage magnétique.....	33
2.1.1 Principe de fonctionnement de l'engrenage magnétique .....	33
2.1.2 Choix du rapport d'engrenage magnétique.....	38
2.1.3 Facteur de cogging.....	39
2.1.4 Rapport de focalisation de flux.....	40
2.1.5 Densité de couple volumétrique.....	40
2.1.6 Couple par volume d'aimants permanents.....	41
2.1.7 Ondulation de couple .....	41
2.1.8 Pertes lors de la transmission du couple .....	41

2.2	Présentation de l’outil de recherche.....	43
2.2.1	Méthode des éléments finis dans Ansys Maxwell .....	43
2.2.2	Présentation de l’interface d’Ansys Maxwell .....	43
2.3	Choix de la topologie et méthode d’optimisation.....	44
<b>CHAPITRE 3 PRÉSENTATION ET VALIDATION DU MODÈLE OPTIMISÉ</b>		
<b>DE L’ENGRENAGE MAGNÉTIQUE HYBRIDE.....</b>		
3.1	Proposition de l’engrenage magnétique coaxial hybride .....	47
3.1.1	Optimisation du CMG hybride proposé.....	48
3.1.1.1	Optimisation par balayage des paramètres géométriques .....	49
3.2	Résultats de l’optimisation.....	50
3.3	Analyse des résultats de simulation .....	54
3.3.1	Densité de flux dans l’entrefer et analyse harmonique.....	54
3.3.2	Distribution de flux et maillage .....	56
3.3.3	Formes d’ondes du couple .....	57
3.3.4	Ondulation de couple .....	59
3.4	Comparaison entre le FFH-CMG proposé et ses homologues.....	60
<b>CHAPITRE 4 PRÉSENTATION ET VALIDATION DU MODÈLE OPTIMISÉ</b>		
<b>DE LA MACHINE A ENGRENAGE MAGNÉTIQUE .....</b>		
4.1	Proposition d’une machine à engrenage magnétique.....	63
4.1.1	Principe de fonctionnement .....	64
4.1.2	Moteur électrique à aimants permanents .....	65
4.2	Analyse des résultats de simulation.....	67
4.2.1	Densité de flux dans l’entrefer et analyse harmonique.....	67
4.2.2	Distribution de flux et maillage de la AMGM.....	69
4.2.2.1	Distribution de flux et maillage du FFH-CMG.....	69
4.2.2.2	Distribution de flux et maillage du moteur SPM.....	70
4.2.3	Formes d’ondes du couple .....	70
4.2.4	Ondulation de couple .....	72
4.3	Comparaison entre la machine à engrenage magnétique axial proposée et ses homologues.....	72
<b>CHAPITRE 5 DISCUSSION.....</b>		
5.1	Analyse et interprétation des résultats .....	75
5.2	Comparaison avec les travaux antérieurs.....	76
5.3	Implications et applications pratiques.....	77
5.4	Limites de l’étude .....	77
<b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>		
<b>LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		
		81

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Caractéristiques des différents engrenages magnétiques coaxiaux proposés dans la littérature.....28
Tableau 3.1	Paramètres géométriques du FFH-CMG et propriétés des matériaux .....53
Tableau 3.2	Récapitulatif des résultats de l'étude comparative des CMG .....62
Tableau 4.1	Paramètres géométriques du moteur SPM et propriétés des matériaux.....66
Tableau 4.2	Récapitulatif des résultats de l'étude comparative du MGM.....73
Tableau 5.1	Récapitulatif des résultats obtenus.....76



## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Premiers types d'engrenages magnétiques .....	5
Figure 1.2	Premier engrenage magnétique coaxial .....	6
Figure 1.3	Engrenages magnétiques conventionnels .....	7
Figure 1.4	Engrenage magnétique coaxial à flux radial .....	9
Figure 1.5	Engrenage magnétique coaxial à flux axial .....	10
Figure 1.6	Vue en éclaté de l'engrenage magnétique coaxial à flux axial .....	10
Figure 1.7	Engrenage magnétique à flux transversal .....	11
Figure 1.8	Engrenage magnétique coaxial avec des aimants permanents montés en surface.....	12
Figure 1.9	Engrenage magnétique coaxial avec des aimants permanents intérieurs...	13
Figure 1.10	Engrenage magnétique coaxial à focalisation de flux.....	14
Figure 1.11	Engrenage magnétique coaxial Halbach.....	16
Figure 1.12	Engrenage magnétique à réluctance.....	18
Figure 1.13	Couplage d'un engrenage magnétique et d'un moteur électrique.....	19
Figure 1.14	Machine à engrenage magnétique à trois entrefers.....	20
Figure 1.15	Pseudo machines.....	21
Figure 1.16	Topologie de la pseudo machine à bornes de puissance multiple.....	21
Figure 1.17	Machines à engrenage magnétique à bobinage.....	22
Figure 1.18	Machines PM à stator et machines PS correspondantes .....	24
Figure 1.19	Machines à vernier.....	25
Figure 1.20	Machine à focalisation de flux Tirée de Zhu (2018).....	26
Figure 1.21	Machine à inversion de flux.....	27

Figure 1.22	État général de la densité de couple des différents types d'engrenages magnétiques coaxiaux.....	29
Figure 1.23	État général de l'efficacité de différents types d'engrenages magnétiques coaxiaux.....	29
Figure 1.24	État général de la densité de couple des différents CMG par rapport à l'ondulation de couple.....	30
Figure 1.25	État général de la densité de couple de différents types de machines à engrenages magnétiques.....	31
Figure 1.26	État général de l'efficacité de différents types de machines à engrenages magnétiques.....	31
Figure 2.1	Interface d'Ansys Maxwell.....	44
Figure 3.1	Configuration de l'engrenage magnétique hybride proposée.....	48
Figure 3.2	Dispositions proposées pour les aimants permanents.....	48
Figure 3.3	Paramètres géométriques du FFH-CMG proposé.....	49
Figure 3.4	Évaluation du balayage des paramètres du FFH-CMG proposé.....	51
Figure 3.5	Densité de flux radial ( $B_r$ ) du FFH-CMG proposé.....	55
Figure 3.6	Superpositions de champs du FFH-CMG proposé.....	56
Figure 3.7	Formes d'ondes du couple à l'arrêt du FFH-CMG proposé.....	57
Figure 3.8	Formes d'ondes du couple en régime permanent du FFH-CMG proposé.....	57
Figure 3.9	Formes d'ondes de couple du MG proposé en mode de fonctionnement à vide (FEA 3D).....	58
Figure 3.10	Zoom sur les formes d'ondes du couple en régime permanent.....	59
Figure 3.11	Comparaison du CMG proposé par rapport à ses homologues.....	61
Figure 3.12	Statut général du FFH-CMG proposé par rapport à ses homologues.....	61
Figure 4.1	Vue en coupe de la machine à engrenage magnétique proposée.....	63
Figure 4.2	Vue en éclaté de la machine à engrenage magnétique proposée.....	64
Figure 4.3	Configuration du moteur électrique à aimants permanents montés en surface proposée.....	65



Figure 4.4	Paramètres géométriques du moteur SPM.....	65
Figure 4.5	Densité de flux radial ( $B_r$ ) du FFH-CMG couplé au SPM.....	68
Figure 4.6	Distributions de la densité de flux et maillage du FFH-CMG.....	69
Figure 4.7	Distribution de la densité de flux et maillage du moteur SPM.....	70
Figure 4.8	Forme d'onde de couple du moteur SPM.....	71
Figure 4.9	Formes d'ondes de couple de la AMGM proposée en mode de fonctionnement à vide.....	71
Figure 4.10	Formes d'ondes du couple en régime permanent du AMGM proposé.....	71
Figure 4.11	Comparaison de la AMGM proposée par rapport à ses homologues.....	73



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MG	Magnetic Gear
PM	Permanent Magnet
CMG	Coaxial Magnetic Gear
FFCMG	Flux Focusing Cycloidal Magnetic Gear
TROMAG	Trans-Rotary Magnetic Gear
RF-CMG	Radial Flux Coaxial Magnetic Gear
AF-CMG	Axial Flux Coaxial Magnetic Gear
TF-CMG	Transverse Flux Coaxial Magnetic Gear
SPM-CMG	Surface mounted Permanent Magnet Coaxial Magnetic Gear
IPM-CMG	Interior Permanent Magnet Coaxial Magnetic gear
FF-CMG	Flux Focusing Coaxial Magnetic Gear
HPM-CMG	Halbach Permanent Magnet
R-CMG	Reluctance Coaxial Magnetic Gear
FFAMG	Flux Focusing Axial Magnetic Gear
ATFMG	Axial Transverse Flux Magnetic Gear
MGM	Magnetically Geared Machine
RFMGM	Radial Flux Magnetically Geared Machine
AFMGM	Axial Flux Magnetically Geared Machine
AMGM	Axial Magnetically Geared Machine
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machines
PS	Partitioned Stator
PMVM	Permanent Magnet Vernier Machines

FSPM	Flux-Switching Permanent Magnet
FRPM	Flux Reversal Permanent Magnet
NdFeB	Neodymium Magnet
FEM	Finite Element Method
FEA	Finite Element Analysis
2D	Two-Dimensional
3D	Three-Dimensional
VTD	Volumetric Torque Density
TPMV	Torque per Permanent Magnet Volume
SMC	Soft Magnetic Composite

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

mm	millimètres
Nm	newton mètre
kNm	kilonewton mètre
°	degré
rad	radian
%	pourcentage
tr/min	tour par minute
kg/m <sup>3</sup>	kilogramme par mètre cube
T	Tesla



## INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, l'évolution technologique est marquée par des avancées significatives dans le domaine de la transmission de puissance. Allant de la transmission mécanique à la transmission entièrement électrique et sans fil, le besoin grandissant de transférer de la puissance d'une façon efficace et fiable vers une charge conduit plusieurs acteurs dans une course effrénée pour concevoir des dispositifs de transmission plus performants et pouvant être appliqués dans les domaines tels que les véhicules électriques, les éoliennes, l'aérospatial, etc.

Les systèmes à entraînement direct suscitent une attention particulière ces dernières années en raison des nombreux avantages qu'ils offrent en ce qui concerne la simplicité et l'efficacité de transmission. Cependant, ils sont souvent confrontés aux contraintes de poids et de coût liées à la nécessité de générer le couple nécessaire à l'entraînement de la charge. En effet, l'inadéquation entre les caractéristiques de vitesse-couple du moteur et la charge conduit à l'adoption d'une meilleure option qui consiste à coupler une machine à grande vitesse à un système de transmission par engrenage magnétique (Wang et al., 2019). Cette option nommée machine à engrenage magnétique (en anglais *Magnetically Geared Machine* ou MGM) offre une solution efficace qui permet de résoudre parfaitement le problème mentionné précédemment en maintenant la capacité de couple malgré la petite taille et le poids réduit du moteur.

Ainsi, les projets de recherche sur la conception d'une MGM se multiplient afin d'améliorer leurs performances. Dans cette optique, l'objectif de ce présent mémoire est de concevoir une MGM qui offre une densité de couple élevée, tout en présentant une faible ondulation de couple et un volume optimal d'aimants permanents utilisés.

Pour atteindre cet objectif, une collecte de données à partir des sources existantes est effectuée. Par la suite, ces données sont analysées en utilisant des matrices afin d'extraire les informations pertinentes. Ensuite, le logiciel Ansys Maxwell est utilisé pour procéder à la

conception de la MGM, tout en optimisant les principaux paramètres de conception grâce à la méthode par balayage de paramètres.

## **0.1 Objectifs de recherche**

Comme discuté dans la section précédente, cette recherche vise à concevoir une MGM qui répond à trois principaux objectifs. Le premier objectif est d'atteindre une densité de couple élevée. Le deuxième objectif est de réduire le plus possible l'ondulation de couple et le troisième est d'utiliser le volume minimum d'aimants permanents requis afin de réduire le coût total de la MGM.

## **0.2 Organisation du mémoire**

Ce mémoire est composé de cinq chapitres :

Le CHAPITRE 1 présente une revue de littérature sur les différentes topologies, les développements récents des engrenages magnétiques et des machines à engrenages magnétiques. Les avantages et les limites de chaque topologie sont discutés. Un historique rapide des MG est également présenté.

Le CHAPITRE 2 permet de discuter de la méthodologie de recherche. Il présente les fondements mathématiques du MG, l'outil utilisé pour la recherche et fournit une description détaillée de la méthodologie de recherche.

Le CHAPITRE 3 présente la configuration de l'engrenage magnétique hybride (FFH-CMG) proposé, les résultats de l'optimisation et l'analyse par FEA 2D, 3D du modèle optimisé. Une étude comparative est ensuite effectuée entre le CMG proposé et les CMG existants.

Le CHAPITRE 4 présente la configuration de la machine à engrenage magnétique proposée et l'analyse par FEA 3D de celle-ci. Une étude comparative est ensuite effectuée entre la AMGM proposée et les MGM existants.



Le CHAPITRE 5 présente finalement un récapitulatif du travail effectué, des discussions sur les résultats obtenus et sur les limites de l'étude.

### **0.3 Contributions**

Ce mémoire a fait l'objet de deux présentations à des conférences. La première est exposée à la conférence de l'ITEC Asia-Pacific 2022. Elle concerne une revue réalisée sur les moteurs-roues utilisés pour la propulsion des véhicules électriques. La deuxième est présentée au PEDS 2023. Elle concerne la proposition d'un engrenage magnétique hybride qui utilise la technique de focalisation de flux et un arrangement d'aimants permanents halbach.

Dans ce mémoire, il est proposé un engrenage magnétique hybride (FFH-CMG) et une machine à engrenage magnétique axial (AMGM). L'optimisation de la conception est réalisée à l'aide de la méthode par balayage paramétrique. Les modèles optimisés sont ensuite validés par l'analyse des éléments finis en 2D et en 3D. Les résultats de simulation démontrent que les deux modèles proposés atteignent une densité de couple très élevée. Cela constitue une contribution non négligeable dans le domaine des véhicules électriques.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### 1.1 Historique rapide de l'engrenage magnétique

Le concept de l'engrenage magnétique (en anglais *Magnetic Gear* ou MG) est né en 1901 (Wang et al., 2019). Armstrong (1901) propose un dispositif de transmission de couple composé de deux roues dentées comme illustré à la figure 1.1.(a) la force magnétique qui sert à cette transmission est produite par le biais de bobines. En 1941, le premier engrenage magnétique qui utilise des aimants permanents (en anglais *Permanent Magnet* ou PM) pour générer des champs magnétiques est inventé. Dans ce type de MG, les forces motrices sont transmises par la répulsion des forces magnétiques produites par ces aimants. En 1968, un nouveau type de MG nommé engrenage magnétique coaxial (CMG) constitué de trois parties est proposé par Martin (Filippini, 2018). Les figures 1.1.(b) et 1.2 illustrent les MG discutés précédemment.

Le MG offre plusieurs avantages intrinsèques tels que, de faibles vibrations, l'absence de lubrification à l'exception des enroulements à billes, la réduction du bruit acoustique et la protection contre les surcharges (Uppalapati & Bird, 2012). Ce qui le rend plus attractif que son homologue mécanique.

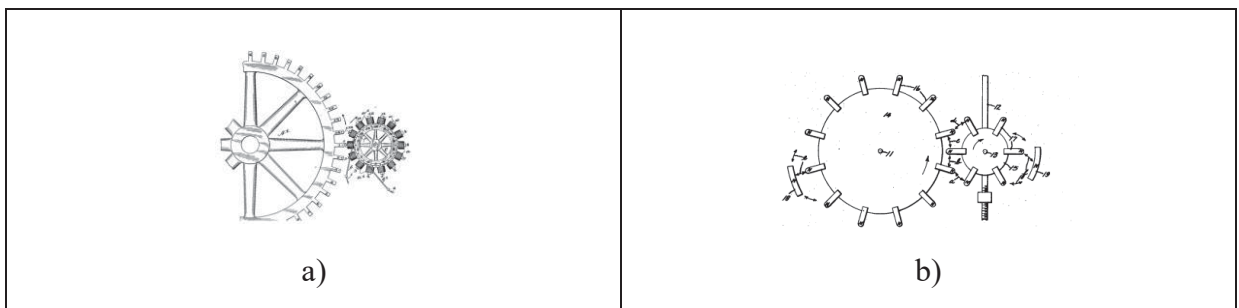


Figure 1.1 Premiers types d'engrenages magnétiques  
a) Tirée de ARMSTRONG (1901) ; b) Tirée de FAUS (1941)

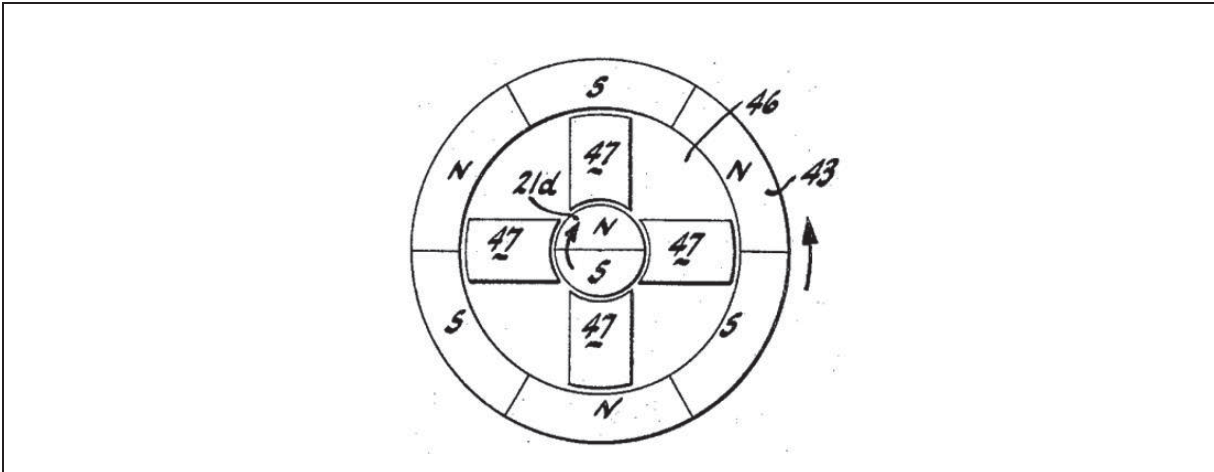


Figure 1.2 Premier engrenage magnétique coaxial  
Tirée de MARTIN (1968)

## 1.2 Topologie des engrenages magnétiques

Les topologies des MG peuvent être subdivisées en deux groupes : Les MG conventionnels non modulés et les MG modulés.

### 1.2.1 Engrenages magnétiques conventionnels non modulés

Les MG conventionnels dérivent en grande partie de leurs homologues mécaniques et ont un principe de fonctionnement similaire à ceux-ci à la seule exception que la transmission du couple se fait par interaction magnétique sans contact. Parmi ceux-ci on peut citer : l'engrenage à vis sans fin (Kikuchi & Tsurumoto, 1993), engrenage à pignon et crémaillère (Jang et al., 2019), engrenage à dents (Bang et al., 2018), vis magnétique (Wang et al., 2011), engrenage planétaire (Huang et al., 2008), engrenage perpendiculaire (Yao et al., 1996). Ces MG sont peu utilisés à leur début dû à une densité de couple plus faible que leurs homologues mécaniques (Li et al., 2013 ; Tlali et al., 2014). La figure 1.3 illustre l'ensemble des MG conventionnels cités précédemment.

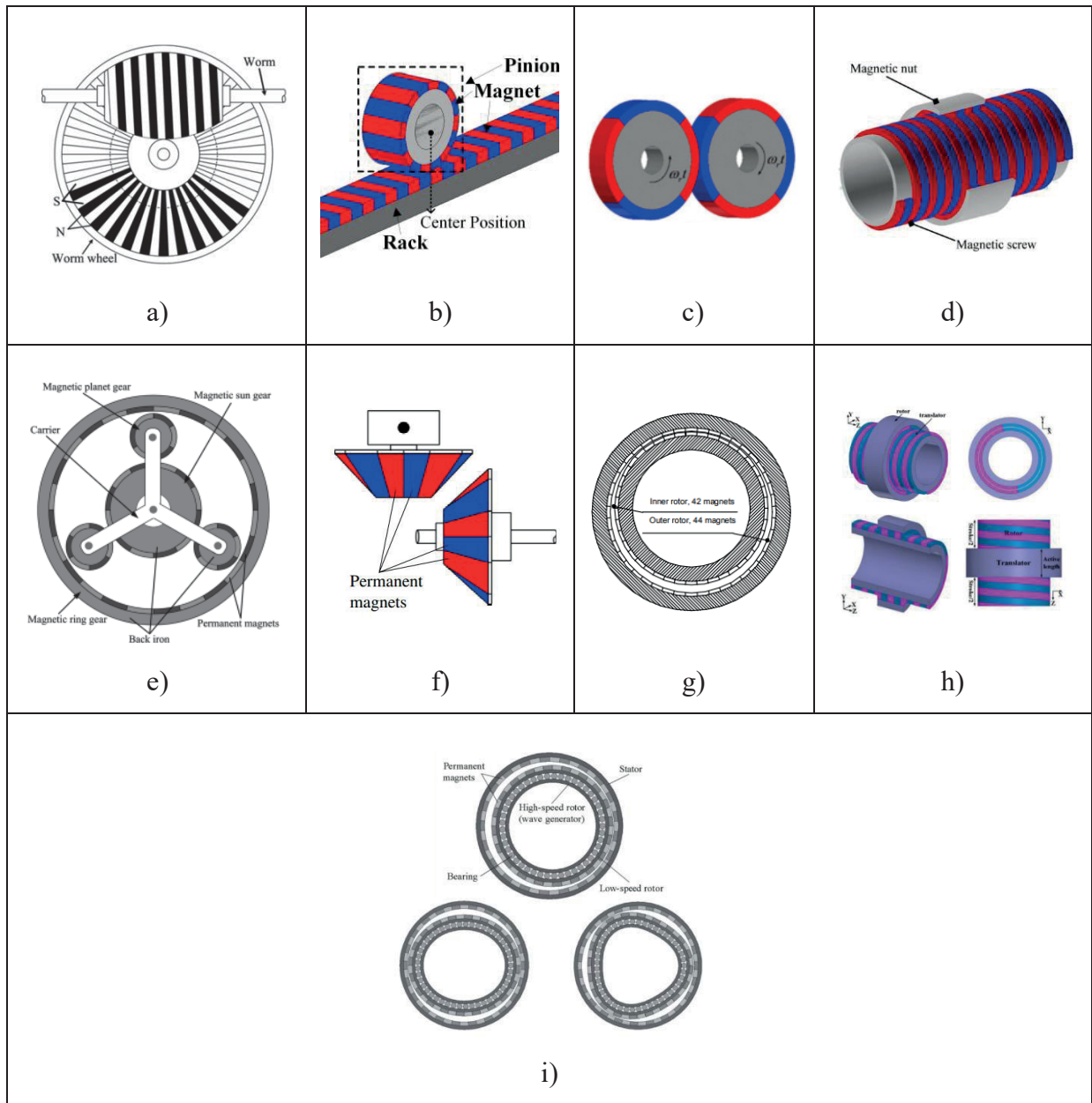


Figure 1.3 Engrenages magnétiques conventionnels

a) Tirée de Kikuchi & Tsurumoto (1993) ; b) Tirée de Jang et al. (2019) ; c) Tirée de Bang et al. (2018) ; d) Tirée de Wang et al. (2011) ; e) Tirée de Huang et al. (2008) ; f) Tirée de Yao et al. (1996) ; g) Tirée de Joergensen et al. (2006) ; h) Tirée de Pakdelian et al. (2015) ; i) Tirée de Rens et al. (2010)

Les progrès continus réalisés à ce jour au niveau des engrenages magnétiques conventionnels permettent d'obtenir des engrenages à forte densité de couple aussi compétitifs que ceux de leurs homologues mécaniques (Aiso et al., 2020; Liu et al., 2022). Une boîte de vitesses magnétique cycloïdale (en anglais *Flux Focusing Cycloidal Magnetic Gearbox* ou FFCMG) basée sur l'utilisation d'un entrefer non uniforme permet d'atteindre une densité de couple volumétrique de  $291 \text{ kNm/m}^3$  (Li et al., 2015). Cette structure crée une grande distribution de force radiale non uniforme qui entraîne une contrainte importante sur les paliers mécaniques du FFCMG. Un engrenage magnétique transrotatif (en anglais *Trans-Rotary Magnetic Gear* ou TROMAG) proposé par Pakdelian et al. (2015) permet de convertir un mouvement linéaire en un mouvement rotatif et vice versa. Un engrenage magnétique harmonique, similaire à son homologue mécanique comme présenté à la figure 1.2.(i) et basé sur la création d'un flux magnétique qui varie d'une manière sinusoïdale dans le temps permet d'atteindre une densité de couple volumétrique de  $150 \text{ kNm/m}^3$  (Rens et al., 2010).

### 1.2.2 Engrenages magnétiques modulés

Le concept de l'engrenage magnétique modulé a vu le jour à la fin des années 1960 (Tlali et al., 2014). Il est constitué de trois parties : un rotor intérieur (grande vitesse), un rotor extérieur (faible vitesse) et un modulateur de flux (rotor à pièce polaire) situé entre eux. Le premier engrenage magnétique modulé (en anglais *Coaxial Magnetic Gear* ou CMG) est proposé par Atallah et Howe (2001). Le principal avantage de ce type de MG est qu'il permet d'atteindre une densité de couple élevée en engageant tous les aimants permanents (PM) dans la transmission du couple.

Les engrenages magnétiques coaxiaux (CMG) peuvent être classés en fonction de la direction de magnétisation et de la disposition des PM. En fonction de la direction de magnétisation des PM, trois types de CMG peuvent être cités : le CMG à flux radial, axial et transversal.

### 1.2.2.1 Engrenage magnétique coaxial à flux radial

Le CMG radial (RF-CMG) a une topologie dans laquelle la transmission d'énergie s'effectue dans une direction radiale. Les PM sont disposés en forme de disque autour du rotor central. Il n'est pas adapté aux systèmes qui nécessitent un couple et une vitesse élevée (Li et al., 2011). La figure 1.4 illustre la configuration d'un CMG radial.

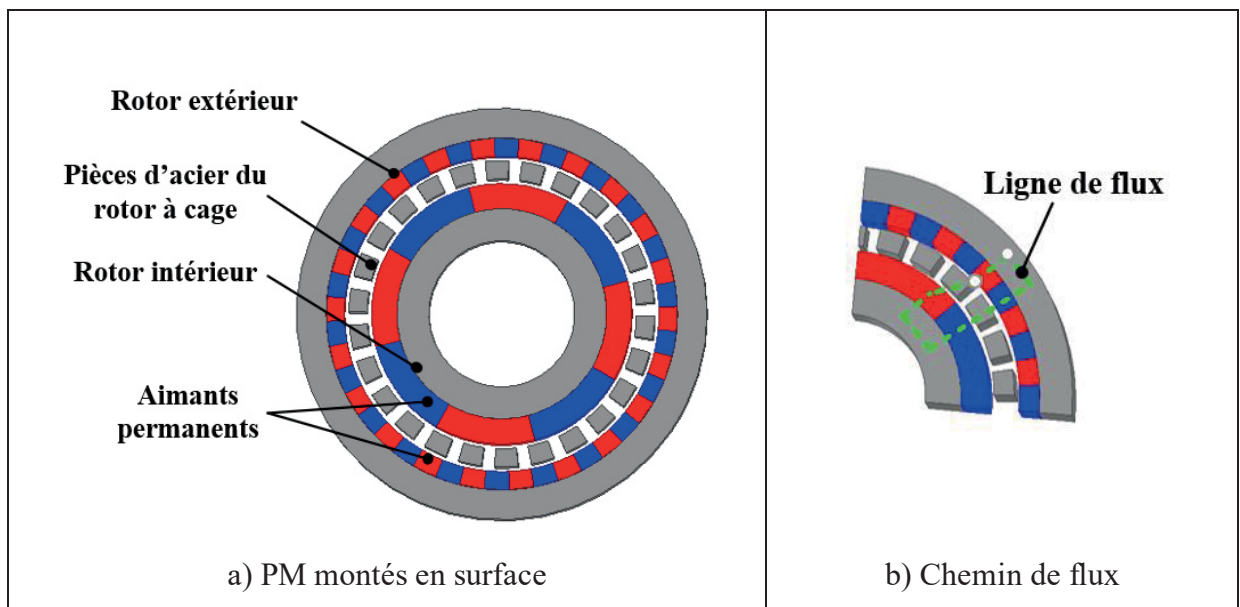


Figure 1.4 Engrenage magnétique coaxial à flux radial

### 1.2.2.2 Engrenage magnétique coaxial à flux axial

Le CMG à flux axial (AF-CMG) a l'avantage d'avoir une taille axiale plus petite et un assemblage facile (Dai et al., 2020). Il a une topologie dans laquelle la transmission d'énergie s'effectue dans une direction axiale et est adapté aux systèmes qui nécessitent une isolation hermétique entre l'arbre d'entrée et l'arbre de sortie (Mezani et al., 2006). Il est également adapté aux systèmes qui nécessitent un couple et une vitesse élevée (Chen et al., 2014). Les figures 1.5 et 1.6 illustrent respectivement la configuration et la vue en éclaté d'un CMG axial.

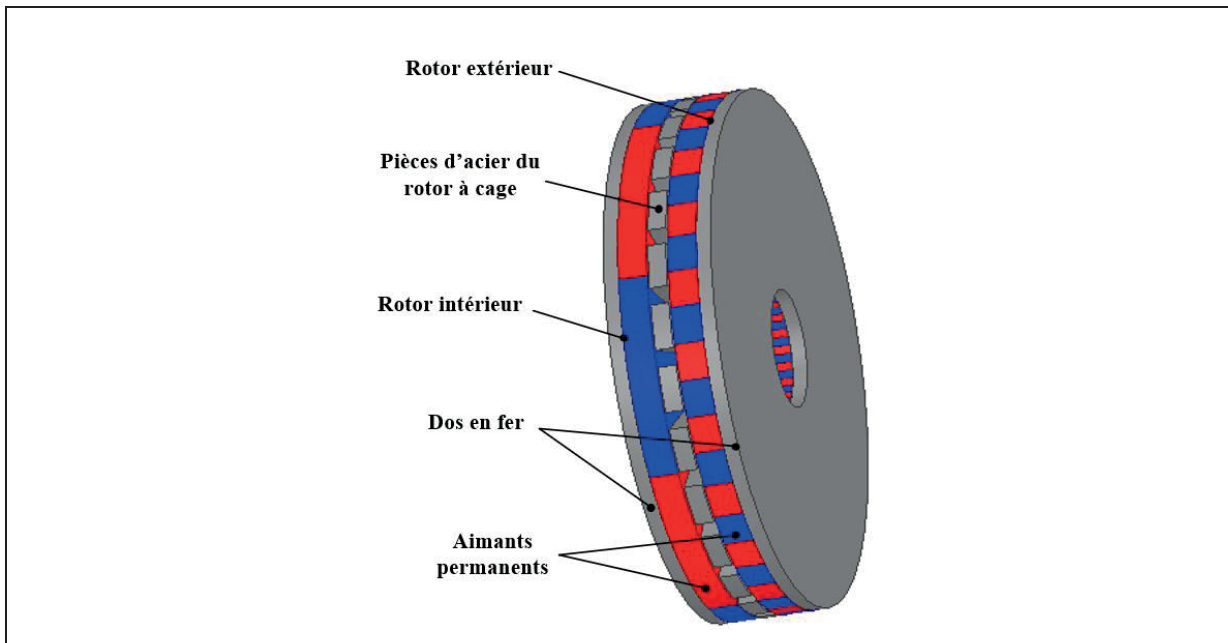


Figure 1.5 Engrenage magnétique coaxial à flux axial

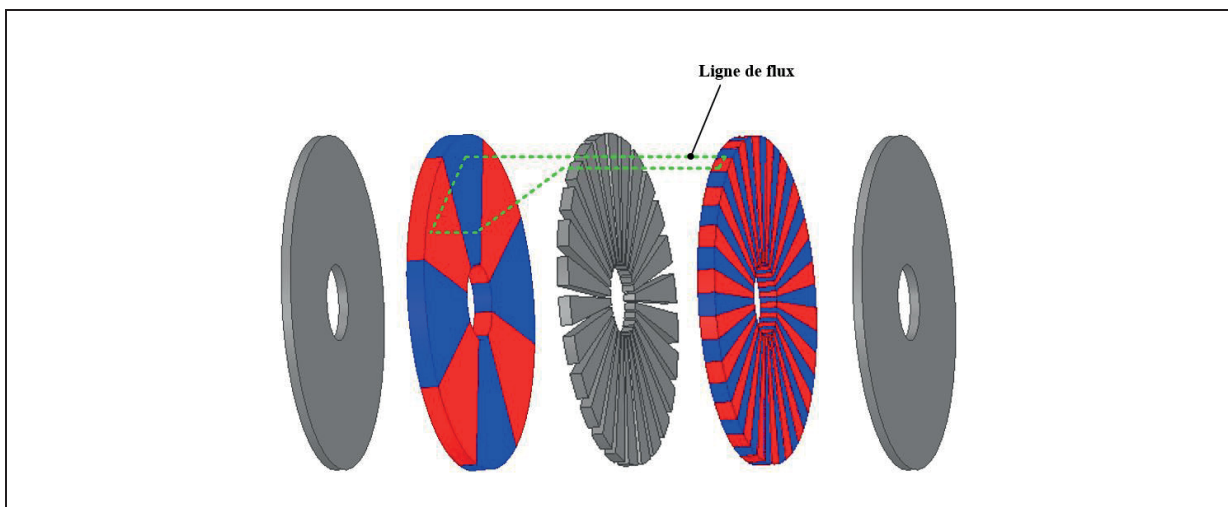


Figure 1.6 Vue en éclaté de l'engrenage magnétique coaxial à flux axial

### 1.2.2.3 Engrenage magnétique coaxial à flux transversal

Le CMG à flux transversal (TF-CMG) a une structure simple à construire qui consiste à superposer axialement deux rotors et à monter les pièces polaires en fer à l'extérieur de



Ces deux rotors (Bomela et al., 2014). Il a une charge magnétique radiale, mais présente un flux axial dans les pièces polaires ferromagnétiques. Il est également adapté aux systèmes qui nécessitent une transmission à vitesse élevée, cependant la variation du flux axial entraîne chez ce type de MG d'importantes pertes de fer (Desvaux et al., 2021).

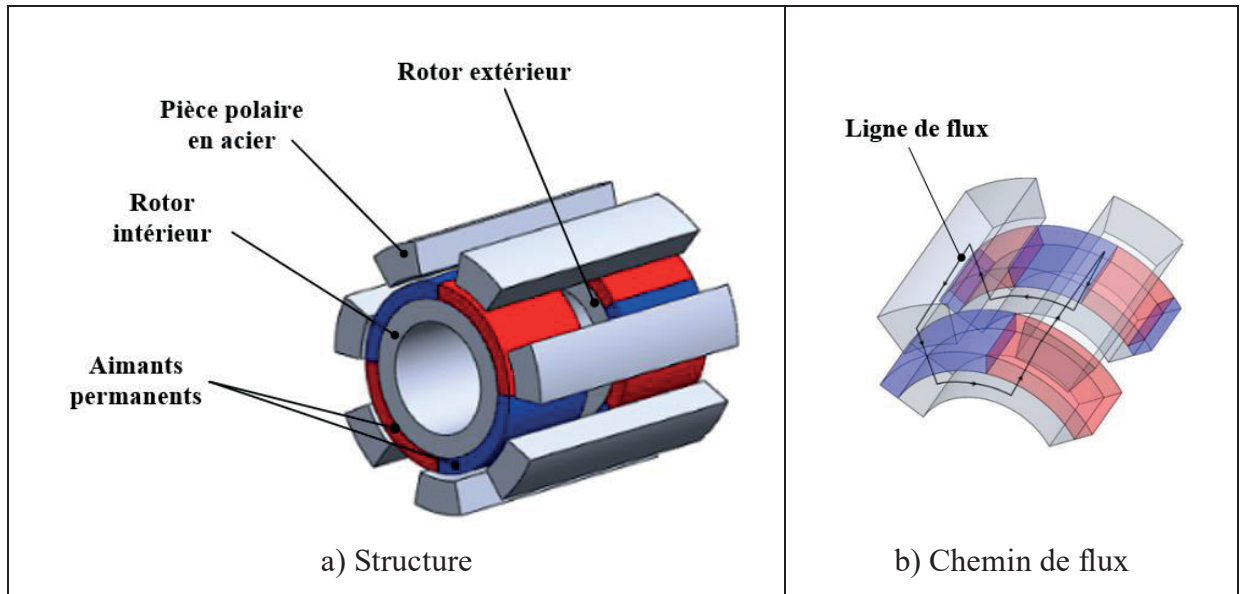


Figure 1.7 Engrenage magnétique à flux transversal  
Tirée de Desvaux et al. (2021)

Les CMG peuvent également être subdivisés en cinq groupes distincts en fonction de la disposition des aimants permanents : SPM-CMG, IPM-CMG, FF-CMG, HPM-CMG, R-CMG.

#### 1.2.2.4 Engrenage magnétique coaxial avec des aimants permanents montés en surface

Le CMG avec des PM montés en surface (en anglais *Surface mounted Permanent Magnet* ou SPM) a une structure simple à construire. Comme son nom l'indique, il a des PM situés sur la surface de ses rotors (intérieur et extérieur). Cependant, en raison des forces centrifuges et de la pression mécanique observées au niveau de ce type de CMG, il n'est pas adapté aux systèmes à vitesse et à couple élevé (Li et al., 2011). En outre, une augmentation de son

rapport d'engrenage entraîne généralement une diminution de son efficacité et de sa densité de couple (Khan et al., 2022). Il est également démontré que l'efficacité de ce type de CMG est fortement affectée par l'augmentation de la vitesse. Cela est dû aux pertes importantes par courants de Foucault observées dans les PM (Kucuk & Mousavi, 2017). La configuration du SPM-CMG est illustrée à la figure 1.8.

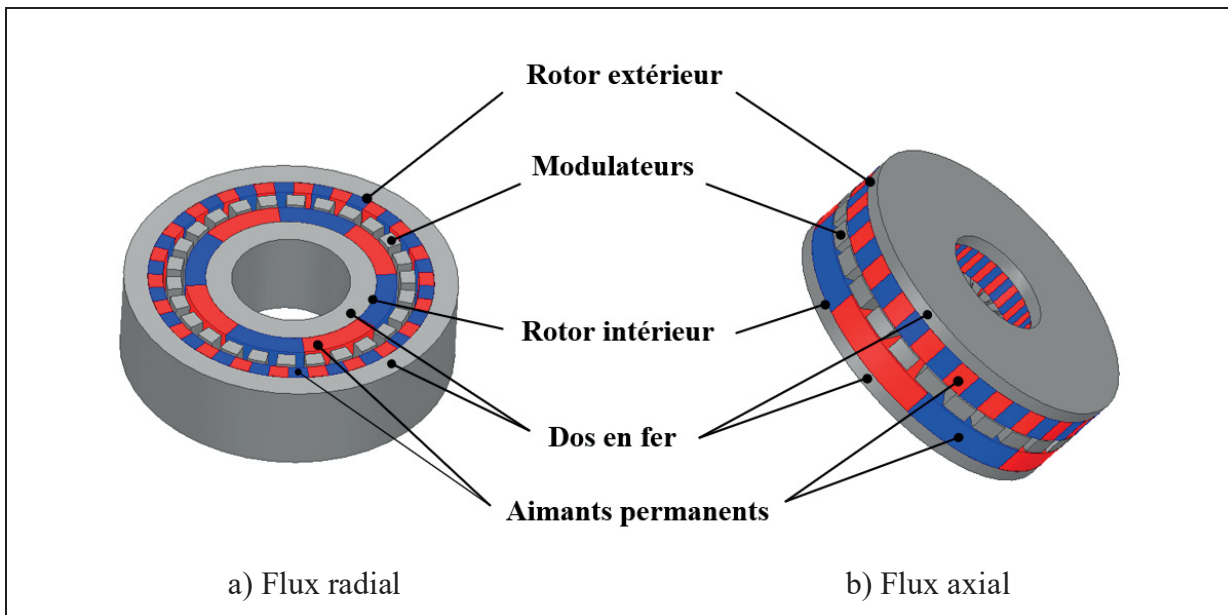


Figure 1.8 Engrenage magnétique coaxial avec des aimants permanents montés en surface

Un CMG à PM monté en surface optimisée par l'algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO) permet d'atteindre une densité de couple de  $124 \text{ kNm/m}^3$  et un couple par volume de PM de  $128 \text{ kNm/m}^3$  (Zhang et al., 2014). Un RM-CMG également étudié par la méthode des éléments finis (3D-FEM) présente des résultats qui sont validés par un prototype. Il atteint une densité de couple de  $139.7 \text{ kNm/m}^3$  (Jian et al., 2009).

#### 1.2.2.5 Engrenage magnétique coaxial à aimants permanents intérieur

Un CMG à aimants permanents intérieurs (en anglais *Interior Permanent Magnet* ou IPM) a une structure dans laquelle les PM sont intégrés dans le rotor. Cela lui permet d'avoir une bonne résistance mécanique, de réduire les pertes par courants de Foucault dans les aimants

et d'avoir une efficacité de transmission élevée (Dai et al., 2020). Il est proposé afin de résoudre les problèmes rencontrés au niveau du CMG à aimants permanents de surface (Kucuk & Mousavi, 2017). La figure 1.9 illustre la configuration du CMG à des aimants permanents intérieurs.

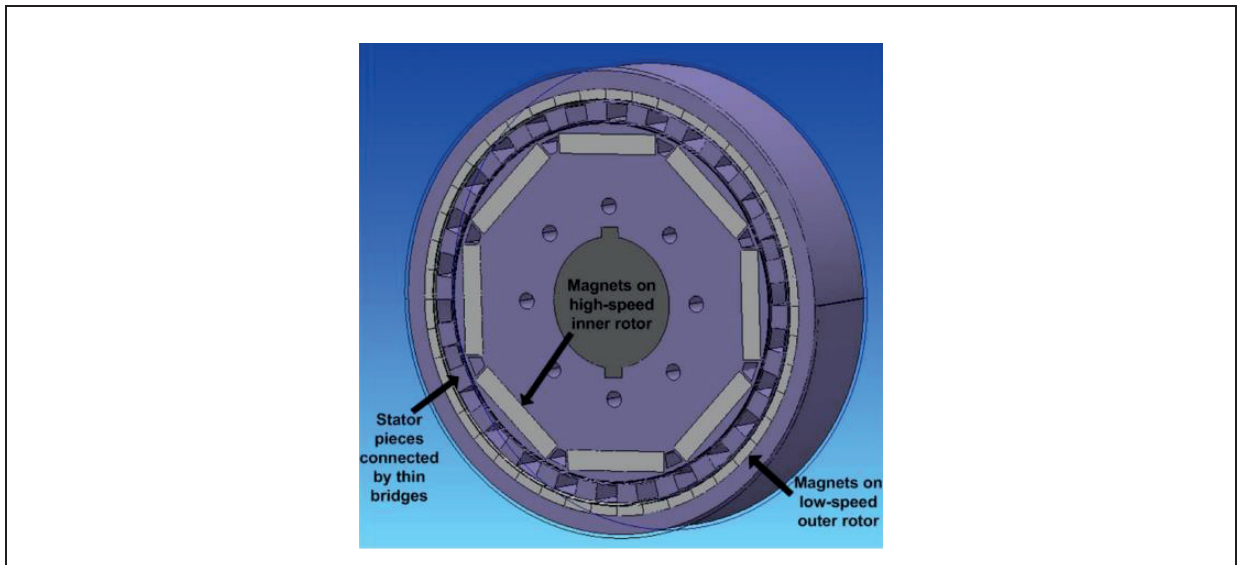


Figure 1.9 Engrenage magnétique coaxial avec des aimants permanents intérieurs  
Tirée de Frank & Toliyat (2010)

Un CMG de type IPM avec des aimants en forme de < V > situé dans le rotor à faible vitesse est proposé. Il permet d'atteindre une densité de couple volumétrique de  $32.97 \text{ kNm/m}^3$  et une efficacité de 99 % (Kucuk & Mousavi, 2017).

En raison d'une perte par courant de Foucault plus importante au niveau du rotor à faible vitesse des MG, deux structures de rotor à faible vitesse à aimants intérieurs, l'une en forme de rayon et l'autre en forme de segments sont proposées. L'analyse révèle que le rendement est plus élevé et les pertes sont plus importantes au niveau de la structure en forme de segments (Dai et al., 2020). Un CMG à flux radial et à aimant intérieur est également proposé. L'optimisation de la forme des pôles de l'aimant intérieur a permis d'améliorer la densité de couple et de réduire le couple de cogging à 3.03 %.

### 1.2.2.6 Engrenage magnétique coaxial à focalisation de flux

La technique de focalisation de flux encore appelée disposition en rayons est une technique dans laquelle les aimants permanents du MG sont orientés tangentiellement. Cette technique permet de concentrer le champ magnétique sur les pôles ferromagnétiques du rotor. Cela entraîne une augmentation de la densité de flux autour de l'entrefer (Som et al., 2017).

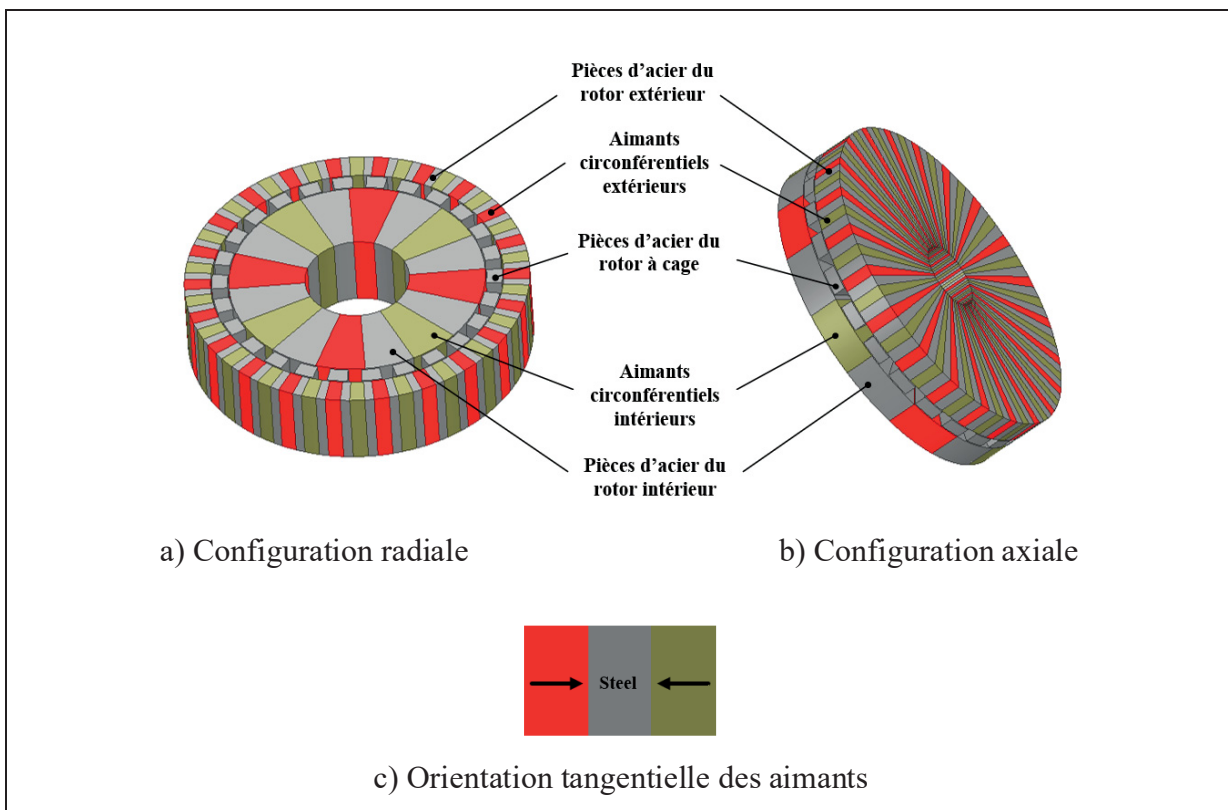


Figure 1.10 Engrenage magnétique coaxial à focalisation de flux

Un engrenage magnétique en ferrite à focalisation de flux (en anglais *Flux Focusing Coaxial Magnetic Gear* ou FF-CMG) est proposé dans le but de remédier au coût très élevé du MG dû à l'utilisation des PM à base de terre rares. Il est optimisé par la méthode de balayage des paramètres de conception. Les résultats sont ensuite validés par analyse des éléments finis (FEA). La densité de couple obtenu est de  $64 \text{ kNm/m}^3$  (Uppalapati & Bird, 2012). Un autre CMG qui utilise l'effet de focalisation de flux sur le rotor extérieur permet d'atteindre une

densité de couple de  $98.1 \text{ kNm/m}^3$ . Il en ressort après comparaison à son homologue conventionnel que le FF-CMG proposé peut atteindre une densité de couple supérieur d'au moins 25 % (Li et al., 2011). Un FF-CMG qui utilise des PM en ferrite est comparé à son homologue hybride qui utilise de la ferrite et du NdFeB. L'étude par FEA de ceux-ci nous donne respectivement une densité de couple de  $52.14 \text{ kNm/m}^3$  et  $84.9 \text{ kNm/m}^3$ . Un prototype est ensuite réalisé pour chacun de ces deux MG, les résultats obtenus sont respectivement  $33 \text{ kNm/m}^3$  et  $66.3 \text{ kNm/m}^3$ . Cet écart entre les résultats obtenus par simulation et ceux obtenus par expérience est dû aux propriétés matérielles des aimants en ferrite et aux propriétés magnétiques de l'acier 416 (Uppalapati et al., 2013). Un autre FFCMG qui utilise uniquement que des PM NdFeB permet d'atteindre une densité de couple de  $151.2 \text{ kNm/m}^3$  (Uppalapati et al., 2014).

Les CMG mentionnés précédemment sont de types radiaux. Cependant, plusieurs CMG à flux axial et à flux transversal utilisant la technique de focalisation de flux sont également proposés. Parmi les CMG à flux axial, nous pouvons citer : l'engrenage magnétique axial à focalisation de flux (en anglais *Flux Focusing Axial Magnetic gear* ou FFAMG) qui utilise des PM en ferrite et qui permet d'atteindre une densité de couple de  $41 \text{ kNm/m}^3$ . L'optimisation du FFAMG proposé est faite en variant sa longueur axiale par rapport à sa longueur radiale (Acharya et al., 2013). Un autre FFAMG qui utilise des PM NdFeB est optimisé par la méthode de balayage des paramètres de conception et permet d'atteindre une densité de couple élevée de  $252.6 \text{ kNm/m}^3$  (Acharya et al., 2014).

Parmi les CMG à flux transversal, on peut citer : l'engrenage magnétique axial transversal à focalisation de flux (en anglais *Axial-Transverse Flux Magnetic Gear* ou ATFMG) qui utilise des pièces polaires en forme de < T > afin de créer des flux axiaux et radiaux. Cette topologie permet d'atteindre une densité de couple de  $282.56 \text{ kNm/m}^3$  (Yin et al., 2015). Un autre ATFMG qui utilise des pièces polaires en forme de < L > afin de créer des flux axiaux et radiaux est également proposé. Il permet d'atteindre une densité de couple de  $74 \text{ kNm/m}^3$  (Tsai & Ku, 2015).

### 1.2.2.7 Engrenage magnétique coaxial Halbach

Un engrenage magnétique Halbach (HPM-CMG) a généralement une structure difficile à assembler (Som et al., 2017). Il utilise des PM disposés selon une configuration de Halbach. Cette disposition particulière des PM entraîne l'augmentation du flux magnétique d'un côté du dispositif et la suppression de celui-ci de l'autre (Jian & Chau, 2010). Cela permet d'atteindre une densité de couple élevée. La figure 1.10 illustre la configuration d'un CMG Halbach.

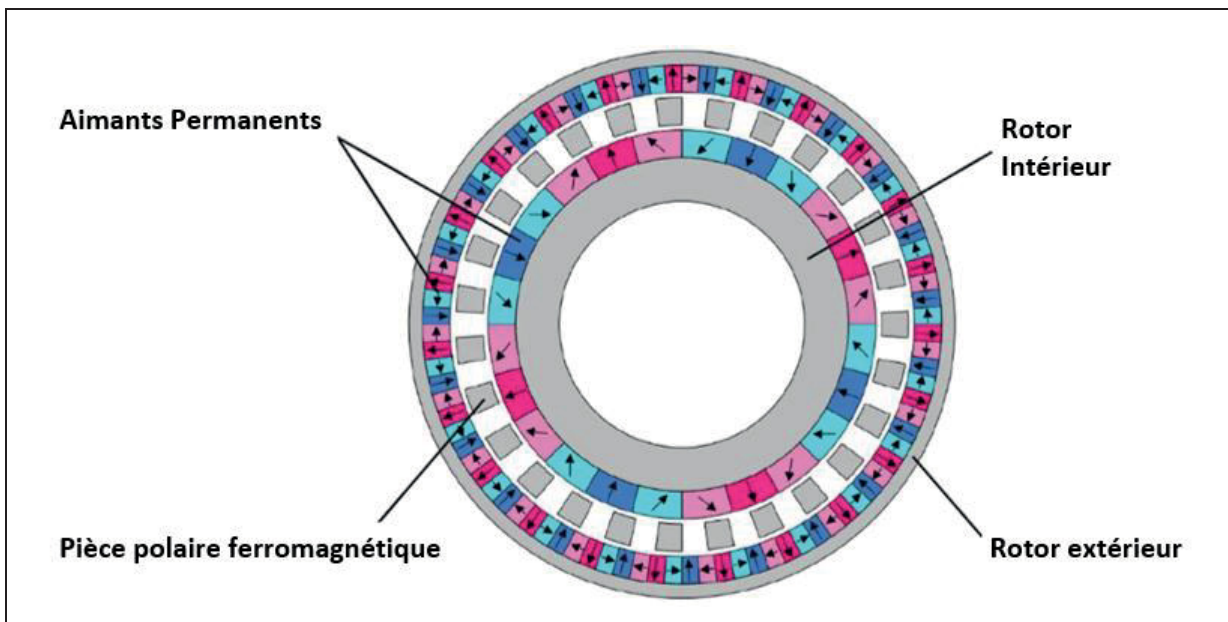


Figure 1.11 Engrenage magnétique coaxial Halbach  
Tirée de Wang et al. (2021)

Plusieurs HPM-CMG sont proposés dans la littérature, parmi ceux-ci on peut citer : le MG Halbach qui adopte une configuration particulière au niveau du rotor à cage et inclut des pôles ferromagnétiques devant les aimants radiaux du rotor à haute vitesse et à basse vitesse. Cette configuration permet de concentrer le flux magnétique et d'atteindre ainsi une densité de couple élevée de  $192.4 \text{ kNm/m}^3$  par FEA et de  $112 \text{ kNm/m}^3$  avec un prototype (Som et al., 2017). Dans le but d'atteindre une densité de couple élevé, un CMG qui intègre une nouvelle configuration de Halbach au niveau du rotor intérieur et un Halbach partiel au niveau du

rotor extérieur est proposé. Il permet d'atteindre une densité de couple de  $124 \text{ kNm/m}^3$  (Jian & Chau, 2010). Un CMG Halbach conçu dans le but de réduire le poids, le volume et le coût d'un MG conventionnel permet d'atteindre une densité de couple de  $139.8 \text{ kNm/m}^3$ , soit 17 % supérieur à celui de son homologue utilisant une magnétisation radiale (Jing & Zhang, 2013). Un autre CMG Halbach a également fait l'objet d'une étude FEA et d'une validation expérimentale. Il permet d'atteindre une densité de couple de  $284 \text{ kNm/m}^3$  (Wong et al., 2019). Cependant, en effectuant des modifications telles que l'utilisation d'un support de tige de modulateur rectangulaire et circulaire, la densité de couple volumétrique de ce CMG est améliorée et atteint  $279.3 \text{ kNm/m}^3$  (Wong et al., 2023).

Parmi les MG à flux axial qui utilise un réseau de Halbach, un HPM-CMG proposé permet de mettre en évidence que le réseau de Halbach permet de réduire l'épaisseur de la culasse et l'ondulation de couple. La densité de couple atteinte est de  $183 \text{ kNm/m}^3$  (Johnson et al., 2015)

#### **1.2.2.8 Engrenage magnétique coaxial à réluctance**

L'engrenage magnétique à réluctance a une structure simple et robuste. Il est composé de trois parties, dont un rotor à grande vitesse (intérieur) constitué de pôles saillants et dépourvus d'aimants permanents, d'un modulateur constitué de pièces polaires en acier et d'un rotor à basse vitesse (extérieur). Il est adapté aux systèmes qui nécessitent une vitesse et une puissance élevée. Le CMG à réluctance permet également d'avoir un rendement élevé. Cela est dû à l'absence des pertes par courant de Foucault au niveau du rotor à grande vitesse. Dans ce type de CMG, le flux magnétique généré par le rotor à faible vitesse est modulé par la perméance des pièces polaires en acier et les dents du rotor à grande vitesse (Aiso & Akatsu, 2016; Aiso et al., 2017). La figure 1.12 illustre la configuration du CMG à réluctance.



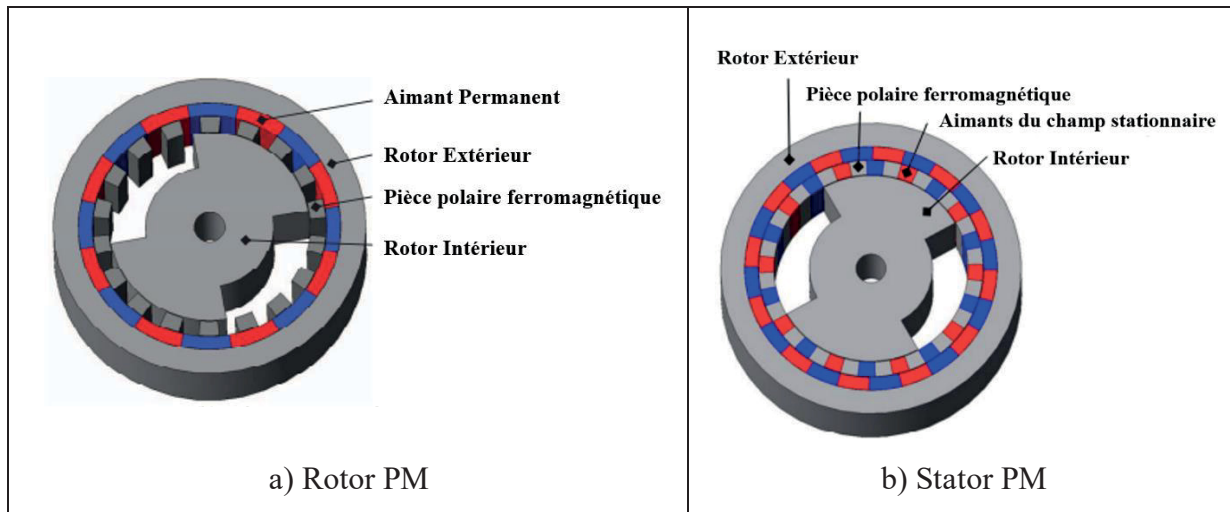


Figure 1.12 Engrenage magnétique à réluctance  
Tirée de Aiso & Akatsu (2016)

Un CMG à réluctance proposé pour un système de moteur à grande vitesse est étudié et analysé par FEA. Il permet d'atteindre une densité de couple de  $34 \text{ kNm/m}^3$  et une efficacité de transmission de 84 % lorsque le rotor à basse vitesse et à haute vitesse tourne respectivement à 5000 tr/min, 30000 tr/min. Ces résultats théoriques sont ensuite validés expérimentalement par le biais d'un prototype (Aiso et al., 2017). Un autre CMG à réluctance proposé par Aiso et al. (2016) permet d'atteindre une densité de couple de  $29.4 \text{ kNm/m}^3$ .

### 1.3 Machine à engrenages magnétique

Une machine à engrenage magnétique (en anglais *Magnetic-Geared Machine* ou MGM) consiste en l'intégration d'une machine électrique à un engrenage magnétique. Ils forment ainsi un dispositif compact qui est adapté aux systèmes qui nécessitent un couple élevé. Les MGM offrent les mêmes avantages qu'offrent les CMG, une faible maintenance, aucune usure par frottement et une longue durée de vie (Gerber & Wang, 2015b). Le MG et la machine électrique peuvent être couplés radialement (en anglais *Radial Flux Magnetic-Geared Machine* ou RFMGM), la machine électrique est placée à l'intérieur du MG. Ils peuvent également être couplés axialement (en anglais *Axial Flux Magnetic-Geared Machine*



ou AFMGM), le MG est couplé sur le même arbre que la machine électrique. La figure 1.13 illustre ces deux types de couplages.

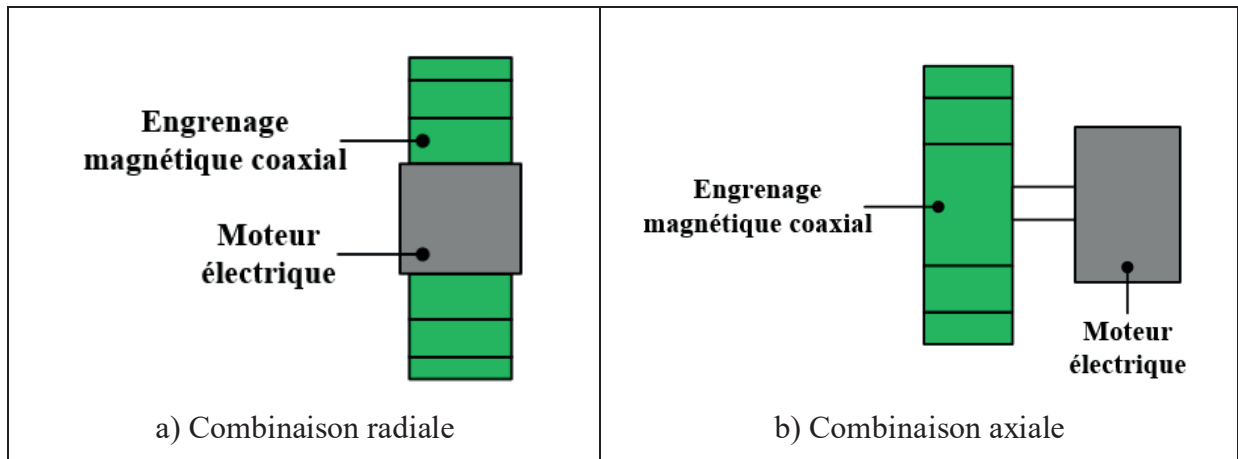


Figure 1.13 Couplage d'un engrenage magnétique et d'un moteur électrique

Les MGM peuvent être classées en fonction du nombre d'entrefer qu'ils possèdent : MGM à trois entrefers, deux entrefers et un entrefer.

### 1.3.1 Machine à engrenage magnétique à trois entrefers

Une MGM à trois entrefers est comme le montre la figure 1.14 constituée de quatre rotors, dont deux extérieurs et deux intérieurs. Elle est caractérisée par une densité de couple très élevée et une structure complexe à fabriquer. Elle peut également fonctionner à des vitesses élevées. Cette machine peut être utilisée pour la production de l'énergie éolienne, la propulsion des navires et comme moteur de traction (Gerber & Wang, 2013a; Jian et al., 2007). La topologie du MGM à stator interne permet d'atteindre les densités de couple les plus élevées (Jian et al., 2007). Trois MGM à stator interne avec une structure complexe à réaliser sont proposées. Elles permettent d'atteindre respectivement une densité de couple de  $73.54 \text{ kNm/m}^3$ , de  $114.6 \text{ kNm/m}^3$  et de  $115 \text{ kNm/m}^3$  (Gerber & Wang, 2013a, 2013b, 2015a). Dans le but de produire de l'énergie éolienne, une machine PM sans balai à haute vitesse intégrée à un engrenage magnétique est proposée. Ce dispositif a l'avantage d'avoir

un volume plus faible et un poids plus léger que son homologue conventionnel. La densité de couple atteinte par cet ensemble compact est de  $97.2 \text{ kNm/m}^3$  (Jian et al., 2007).

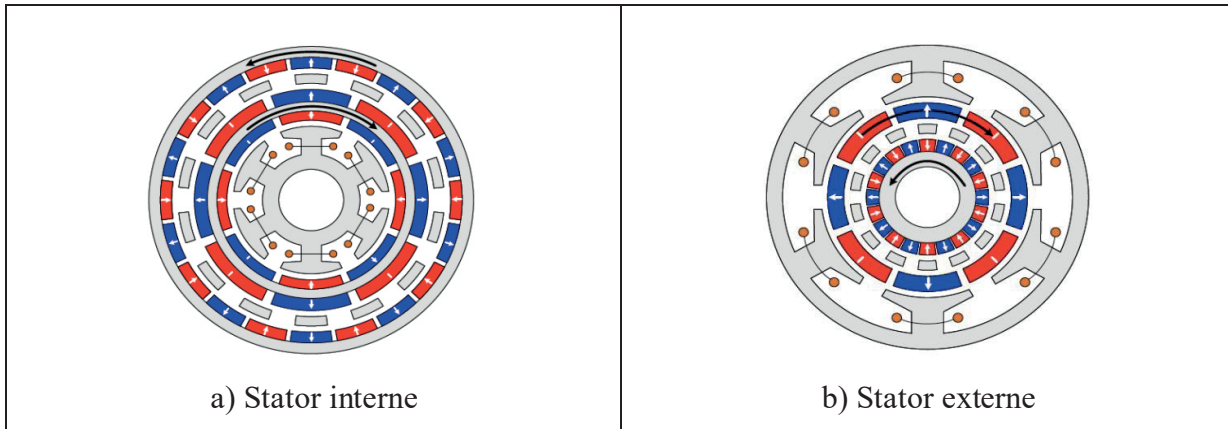


Figure 1.14 Machine à engrenage magnétique à trois entrefers  
Tirée de Zhu et al. (2018)

### 1.3.2 Machine à engrenage magnétique à deux entrefers

Il existe trois types de MGM à deux entrefers qui sont : la pseudo machine, la MGM à bobinage et la MGM à stator partitionné.

#### 1.3.2.1 Pseudo Machines

Dans une machine « pseudo », la machine électrique est couplée mécaniquement et magnétiquement à un engrenage magnétique. Les enroulements de l'induit sont directement insérés dans les fentes du stator comme le montre la figure 1.15.

Deux « Pseudo machines » proposées pour des systèmes d'entraînement direct à couple élevé permettent d'atteindre respectivement une densité de couple de  $60 \text{ kNm/m}^3$  avec un facteur de puissance de 0.9 et une densité de couple de  $73.1 \text{ kNm/m}^3$  avec un facteur de puissance de 0.95 (Atallah et al., 2008). Afin de répondre aux exigences des applications à bornes d'alimentation multiples, une « pseudo » machine proposée (voir figure 1.16) permet d'atteindre après validation par FEA 3D une efficacité élevée de 98.1 % (Wang et al., 2011).

Une autre « pseudo » machine à deux ports de sortie mécanique est également proposée. Elle permet de faire une répartition de la puissance qu'elle génère entre ses ports. Les deux ports atteignent respectivement une densité de couple de  $43 \text{ kNm/m}^3$  et de  $37.5 \text{ kNm/m}^3$  (Chau et al., 2007).

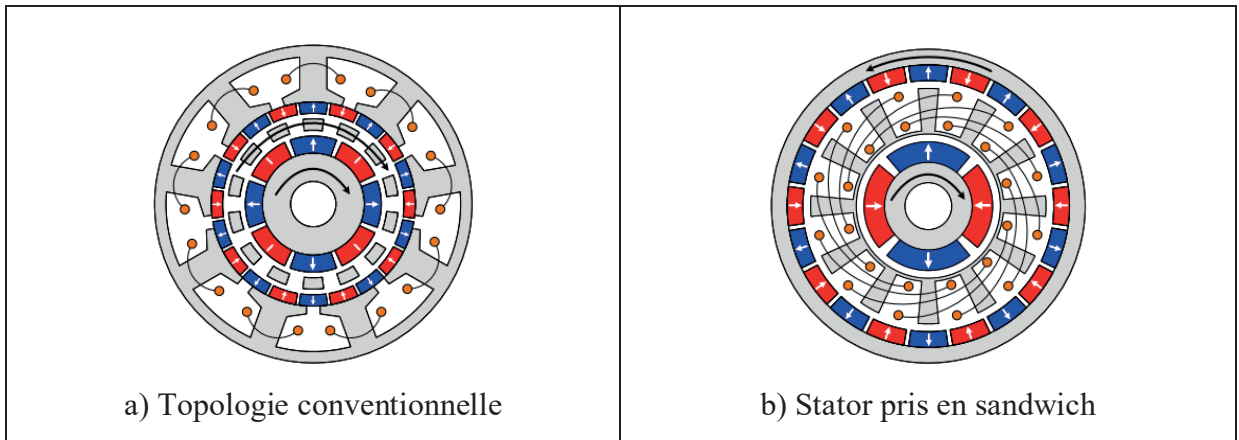


Figure 1.15 Pseudo machines  
Tirée de Zhu et al. (2018)

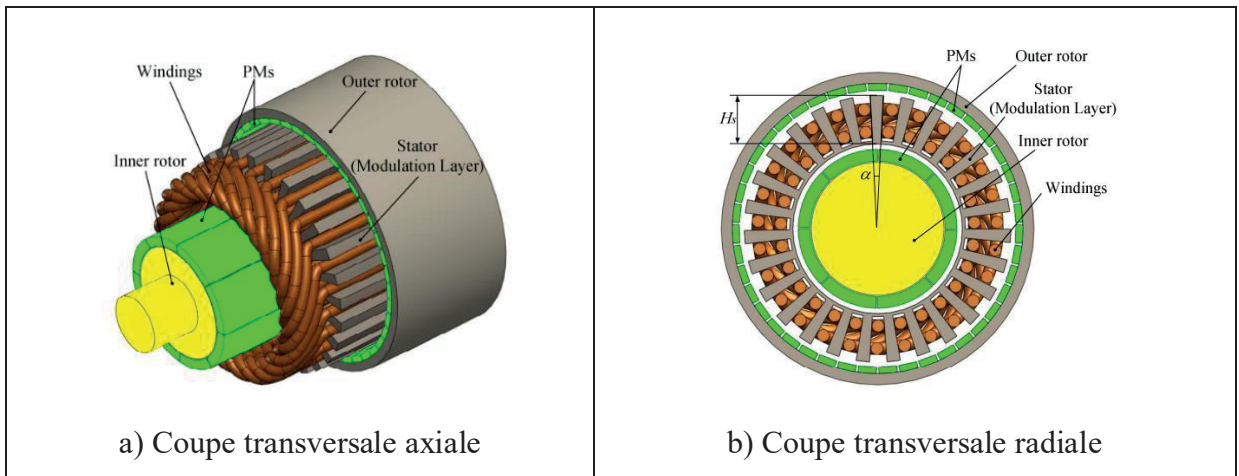


Figure 1.16 Topologie de la pseudo machine à bornes de puissance multiple  
Tirée de Wang et al. (2011)

### 1.3.2.2 Machines à engrenages magnétiques à bobinage

Dans une machine à engrenages magnétiques à bobinage, comme illustré à la figure 1.17.(a), le rotor à haute vitesse est remplacé par un ensemble d'enroulements. Le choix de la configuration de ces enroulements joue un rôle déterminant au niveau de la performance de la machine.

Dans le but d'effectuer une division de puissance au niveau des voitures électriques hybrides, une MGM à bobinage est proposée (voir figure 1.17. [b]). Le choix d'un stator à 21 encoches est fait dans cette machine afin d'obtenir une configuration d'enroulements qui permet d'interagir uniquement qu'avec l'harmonique responsable de la transmission du couple de réactions entre le rotor PM et les pièces polaires ferromagnétiques. Un prototype conçu et testé permet de démontrer qu'une efficacité supérieure à 94 % peut être atteinte (Chmelicek et al., 2019). Une étude réalisée au niveau d'une MGM à bobinage (PMSM FSCW) permet de démontrer que le MG et la machine électrique (PMSM) contribuent tous les deux au couple total de la MGM. L'ouverture des fentes du stator et l'augmentation du rapport d'engrenage entraînent une plus grande contribution du MG au couple total. En outre, il est également démontré qu'une augmentation de l'ouverture des fentes du stator entraîne une augmentation du couple de cogging et de l'ondulation du couple (Liu & Zhu, 2017; Zhu & Liu, 2018).

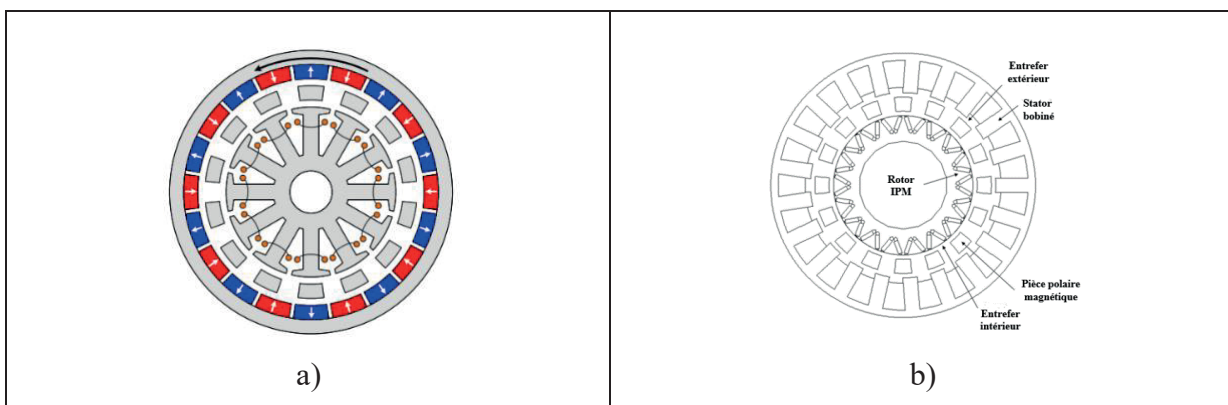
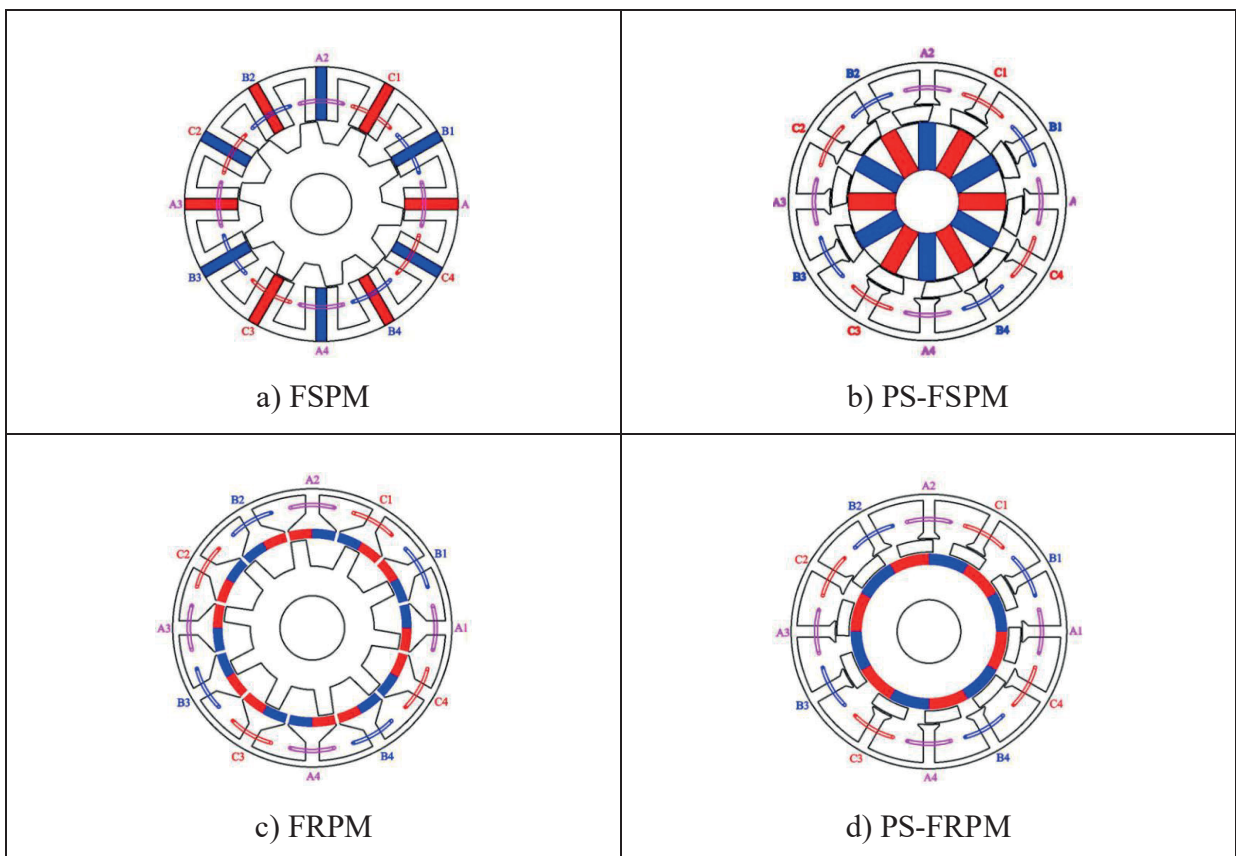


Figure 1.17 Machines à engrenage magnétique à bobinage  
 a) Tirée de Chmelicek et al. (2019) ; b) Tirée de Zhu et al. (2018)

### 1.3.2.3 Machines à engrenage magnétique à stator partitionné

Une machine à stator partitionné (PS) est une combinaison entre une machine PM à stator et un MG. Elle fonctionne sur le principe de commutation de flux et est caractérisée par une densité de couple et un rendement élevé. Les machines PM à flux commuté (FSPM), à flux inversé (FRPM) et à double saillance (DSPM) sont les principales machines PM à stator. Parmi celles-ci, la machine FSPM produit la densité de couple la plus élevée (Wu & Zhu, 2016). Toutes les machines PM à stator peuvent être converties en machine à stator partitionné. L'intérêt de cette conversion réside dans le fait que la machine PS bénéficie de la suppression du conflit entre les PM et les espaces de bobinage de l'induit sur le stator. Cela permet d'augmenter les surfaces de cuivre et de PM afin de réduire les pertes de cuivre, d'augmenter la densité de couple et l'efficacité de la machine. La machine PS permet également de refroidir les aimants permanents (PM) situés au niveau de la machine PM à stator (Zhu, 2018). La figure 1.18 illustre les machines PM à stator et leur correspondante PS.



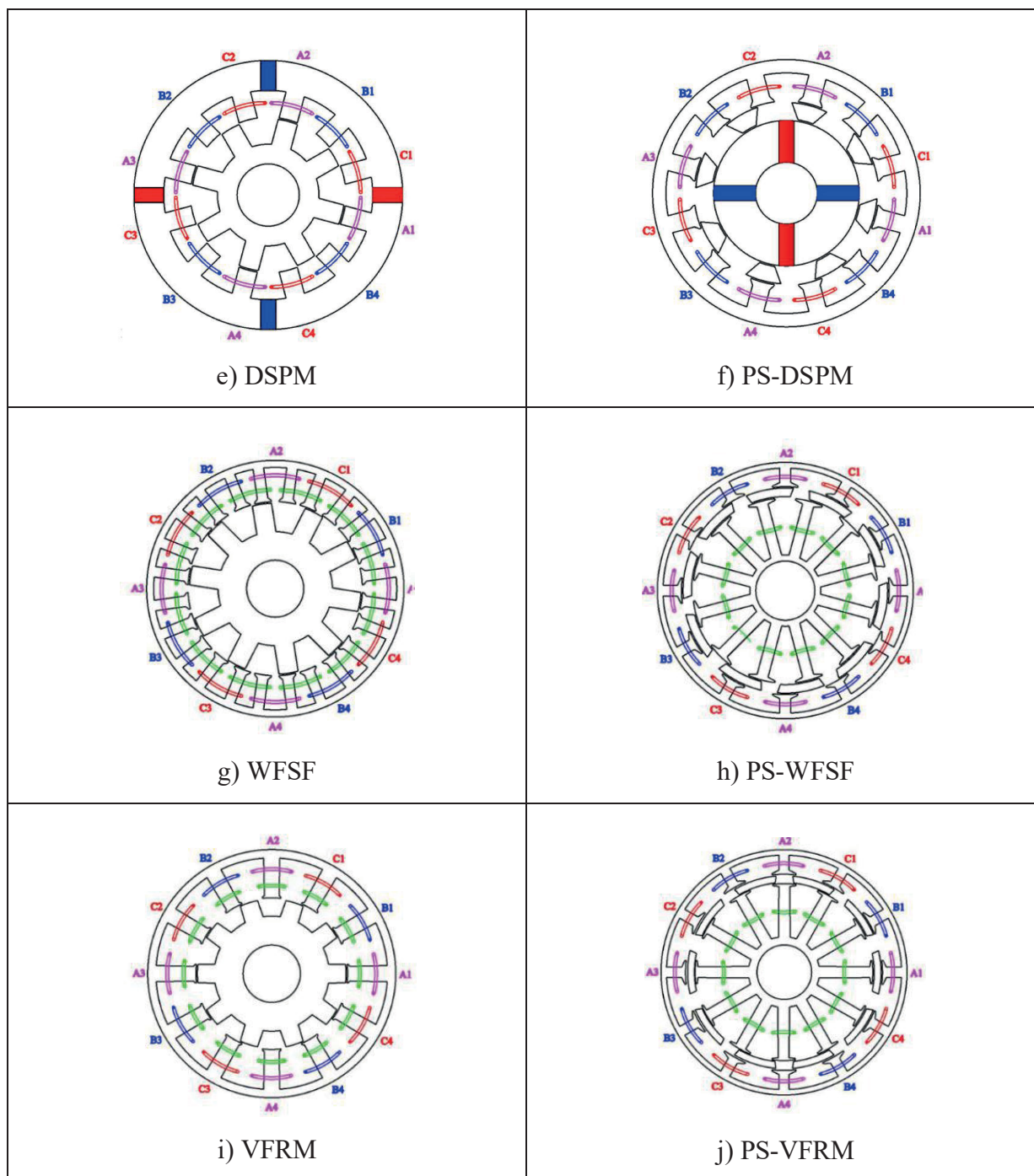


Figure 1.18 Machines PM à stator et machines PS correspondantes  
Tirée de Zhu (2018)



### 1.3.3 Machine à engrenage magnétique à entrefer unique

Une MGM à entrefer unique est une machine qui ne possède qu'un seul entrefer. Les différents types de MGM à entrefer unique sont : la machine à Vernier, la machine à commutation de flux et la machine à inversion de flux.

#### 1.3.3.1 Machines à Vernier

Le concept de la machine à Vernier (en anglais *Permanent Magnet Vernier Machines* ou **PMVM**) est né en 1963 et dérive de la topologie des moteurs à réductance (Lee, 1963). Elle permet d'atteindre une densité de couple élevée et offre plusieurs avantages tels qu'une structure facile à construire, un coût moindre dû à l'utilisation d'une quantité réduite d'aimants (PM) et une grande fiabilité. Cependant, cette machine souffre d'un faible facteur de puissance dû à un flux de fuite excessif dans l'entrefer (Qu et al., 2011). Les machines Vernier sont utilisées dans la production de l'énergie éolienne, au niveau des moteurs-roues et pour la mise au point automatique (Wu & Refaie, 2018). Plusieurs machines PM à vernier sont proposées pour améliorer le faible facteur de puissance. Elles permettent d'atteindre un facteur de puissance élevé allant jusqu'à 0.95 (Li et al., 2013; Liu et al., 2018; Mushenya & Khan, 2021; Wu & Qu, 2019).

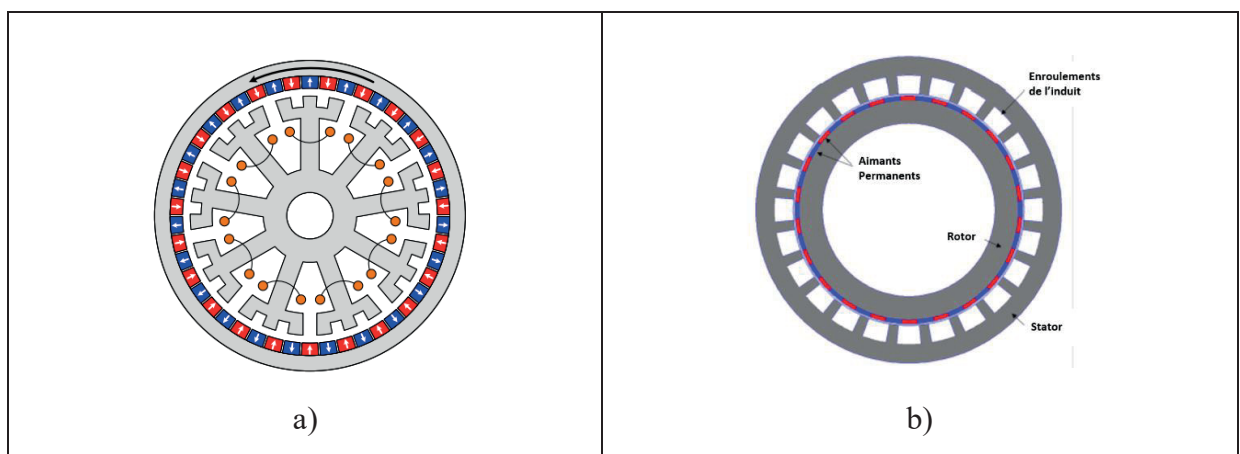


Figure 1.19 Machines à vernier  
a) Tirée de Zhu et al. (2018) ; b) Tirée de Wang et al. (2021)

### 1.3.3.2 Machines à commutation de flux

Le concept de la machine à commutation de flux (*Flux-Switching Permanent Magnet* ou FSPM) est né en 1955 (Rauch & Johnson, 1955). Elle a une structure de rotor à pôles saillants simple à construire, mécaniquement robuste et capable de fonctionner à des vitesses élevées. La figure 1.20 illustre la configuration d'une machine FSPM. La production de couple dans ce type de machine est liée au courant électrique appliqué aux enroulements du stator, au champ magnétique généré par les aimants permanents (PM) du stator et à la géométrie de la machine (McFarland et al., 2015). Le couple optimal du FSPM est obtenu lorsque le nombre de pôles du rotor et de fentes du stator est proche. Il est aussi démontré qu'un nombre élevé de pôles du rotor permet d'obtenir un couple élevé (Chen & Zhu, 2010; Chen et al., 2008; Owen et al., 2010). Les machines FSPM ont une structure qui leur permet de résister à la démagnétisation (McFarland et al., 2014).

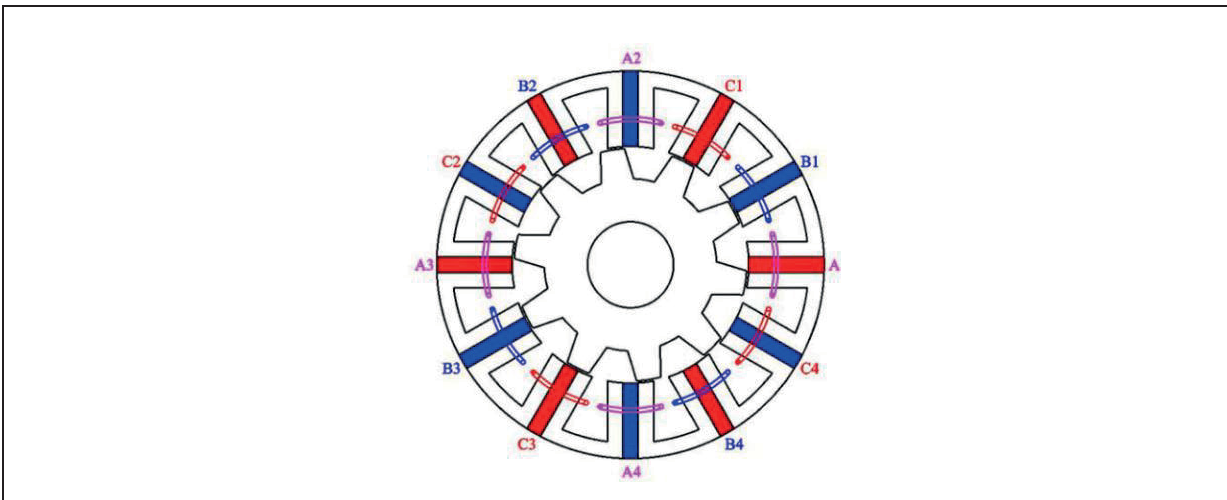


Figure 1.20 Machine à focalisation de flux  
Tirée de Zhu (2018)

### 1.3.3.3 Machine à inversion de flux

Le concept de la machine à inversion de flux (en anglais *Flux Reversal Permanent Magnet* ou FRPM) est apparu pour la première fois en 1996 (Yao et al., 1996). La FRPM a une structure de rotor similaire à celle de la machine à focalisation de flux. Les PM sont situés



au-dessus des dents du stator comme illustré à la figure 1.21. La première machine FRPM proposée (FRPM monophasé) présente un important couple de cogging. Cependant, les nouvelles machines FRPM permettent de résoudre les problèmes rencontrés par les premières générations en réduisant considérablement le couple de cogging, l'ondulation de couple et en atteignant une densité de couple et une efficacité élevée (Gao et al., 2015; Ryu & Hahn, 2019).

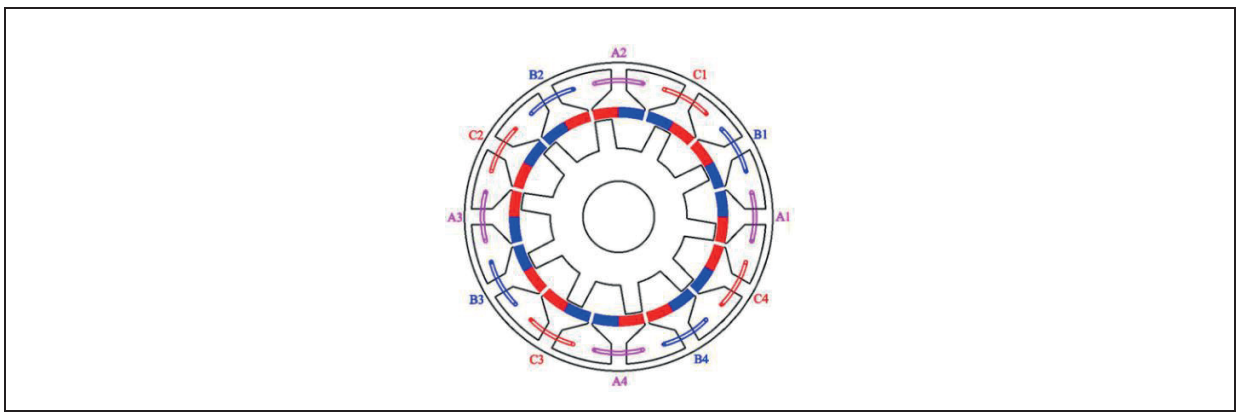


Figure 1.21 Machine à inversion de flux  
Tirée de Zhu (2018)

#### 1.4 État général des différents types d'engrenages magnétiques coaxiaux

Les caractéristiques des différents MG discutés précédemment sont présentées dans le tableau 1.1. L'état général de la densité de couple volumétrique et de l'efficacité des MG sont également présentés respectivement à la figure 1.22 et 1.23. L'étude réalisée précédemment sur les différentes topologies de CMG, montre que contrairement aux CMG Radiaux et aux SPM-CMG ; les AFMG, TF-CMG, FFMG, HPM, R-CMG et les MGM sont adaptés aux systèmes qui nécessitent un couple et une vitesse élevée. L'efficacité du SPM-CMG diminue avec l'augmentation de la vitesse. Les IPM-CMG, avec leur bonne résistance mécanique, permettent de résoudre les problèmes rencontrés au niveau des SPM-CMG et d'obtenir une efficacité élevée à des vitesses élevées. Les TF-CMG ont les structures les plus complexes à fabriquer. La figure 1.23 montre que les CMG ont dans l'ensemble une efficacité de transmission élevée.

Tableau 1.1 Caractéristiques des différents engrenages magnétiques coaxiaux proposés dans la littérature

Type de CMG	Références	VTD (kN.m/m <sup>3</sup> )	TPMV (kN.m/m <sup>3</sup> )	Rapport d'engrenage	Complexité de fabrication
<b>Aimants Permanents montés en surface (SPM)</b>	(Zhang et al., 2014)	124	128	5.5 : 1	Faible
	(Mezani et al., 2006)	70	Pas de rapport	5.75 : 1	Moyen
<b>Aimants permanents intérieurs (IPM)</b>	(Frank & Toliyat, 2010)	42	Pas de rapport	5.5 : 1	Faible
	(Mizuana et al., 2021)	22.6	Pas de rapport	10.33 : 1	Moyen
<b>Focalisation de flux (FF)</b>	(Li et al., 2011)	98.1	Pas de rapport	5.5 : 1	Faible
	(Uppalapati et al., 2013)	84.9	431	4.25 : 1	Faible
	(Uppalapati et al., 2014)	151.2	403.63	4.25 : 1	Faible
	(Acharya et al., 2014)	252.6	Pas de rapport	4.167 : 1	Medium
<b>Aimants permanents Halbach (HPM)</b>	(Som et al., 2017)	112	459	4.25 : 1	High
	(Jian & Chau, 2010)	124	447.53	4.25 : 1	Medium
	(Wong et al., 2023).	279.3	458.17	5.67 : 1	High
	(Johnson et al., 2015).	183.9	Pas de rapport	4.14	Medium
<b>Réductance (R)</b>	(Aiso et al., 2017)	34	138.89	6 : 1	Faible
	(Hasanpour et al., 2020)	70	100	4 : 1	Faible
<b>Flux Transversal (TF)</b>	(Tsai & Ku, 2015)	74	Pas de report	4.167 : 1	Complexe
	(Yin et al., 2015)	282.56	482.3	4.167 : 1	Complexe

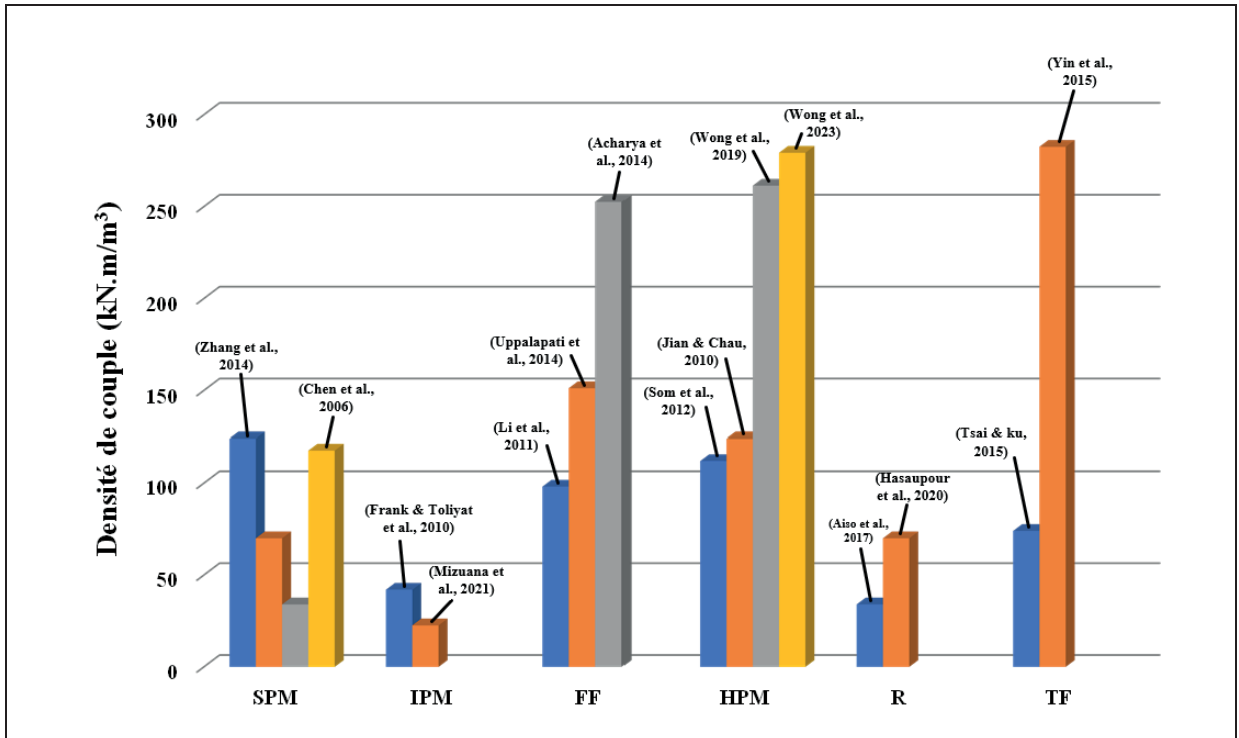


Figure 1.22 État général de la densité de couple des différents types d’engrenages magnétiques coaxiaux

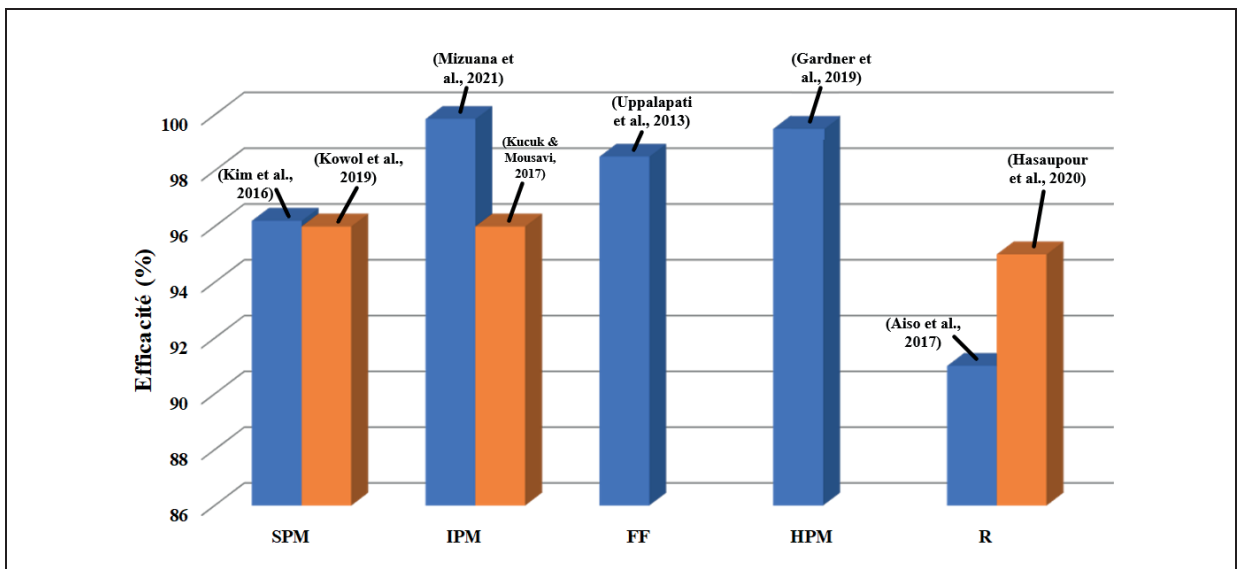


Figure 1.23 État général de l’efficacité de différents types d’engrenages magnétiques coaxiaux

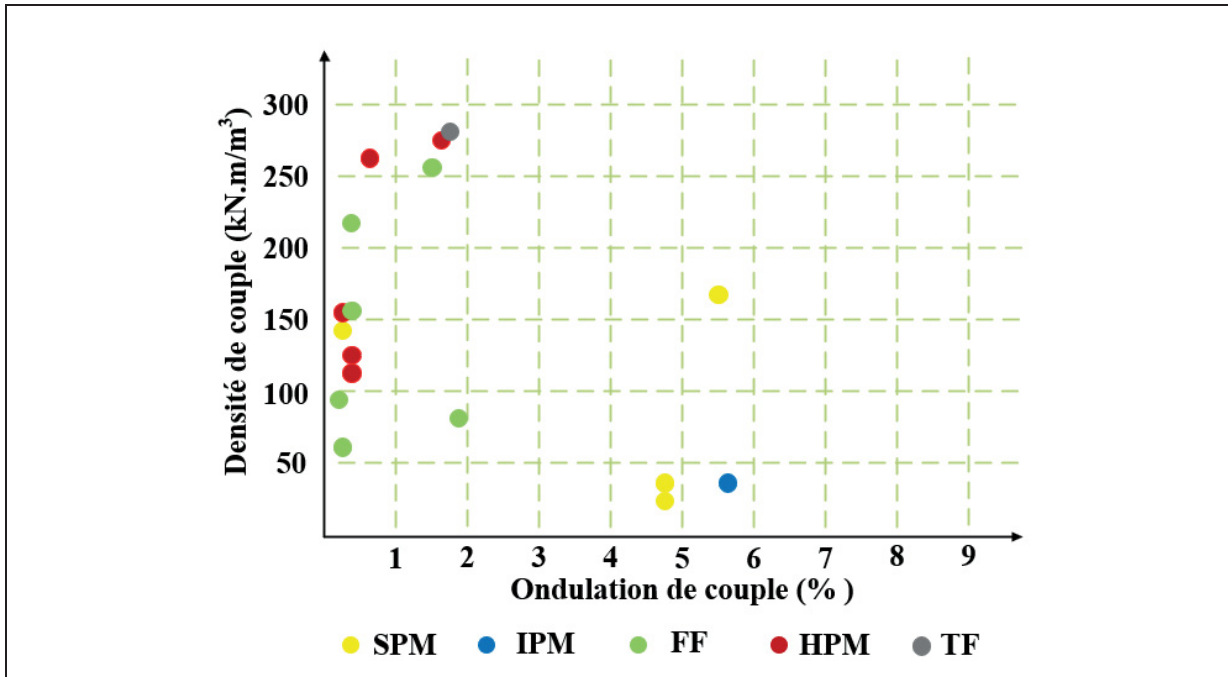


Figure 1.24 État général de la densité de couple des différents CMG par rapport à l'ondulation de couple

La figure 1.24 présente l'état général des différents types de CMG discutés précédemment par rapport à l'ondulation de couple. Il est possible de constater qu'un CMG à flux transversal proposé permet d'atteindre la densité de couple volumétrique la plus élevée (282.56 kNm/m<sup>3</sup>). La plus faible ondulation de couple (0.09 %) est observée au niveau d'un CMG à la focalisation de flux (FFMG). Le défi qui doit être relevé est de concevoir un CMG avec la densité de couple la plus élevée que celle de ses homologues tout en ayant une faible ondulation de couple.

## 1.5 État général des machines à engrenage magnétiques

L'état général de la densité de couple volumétrique et de l'efficacité des machines à engrenages magnétiques (MGM) sont présentés respectivement aux figures 1.25 et 1.26. Ces figures montrent des MGM couplés radialement (RFMGM) et des MGM couplés axialement (AFMGM). La structure de la AFMGM est plus simple à réaliser que celui du RFMGM. Cependant, elle est confrontée à plusieurs défis tels que l'adaptation de la taille entre un MG

à flux axial et une machine électrique à flux axial. Le volume de MG peut diminuer de 50 % la densité de couple de la MGM (Johnson et al., 2017).

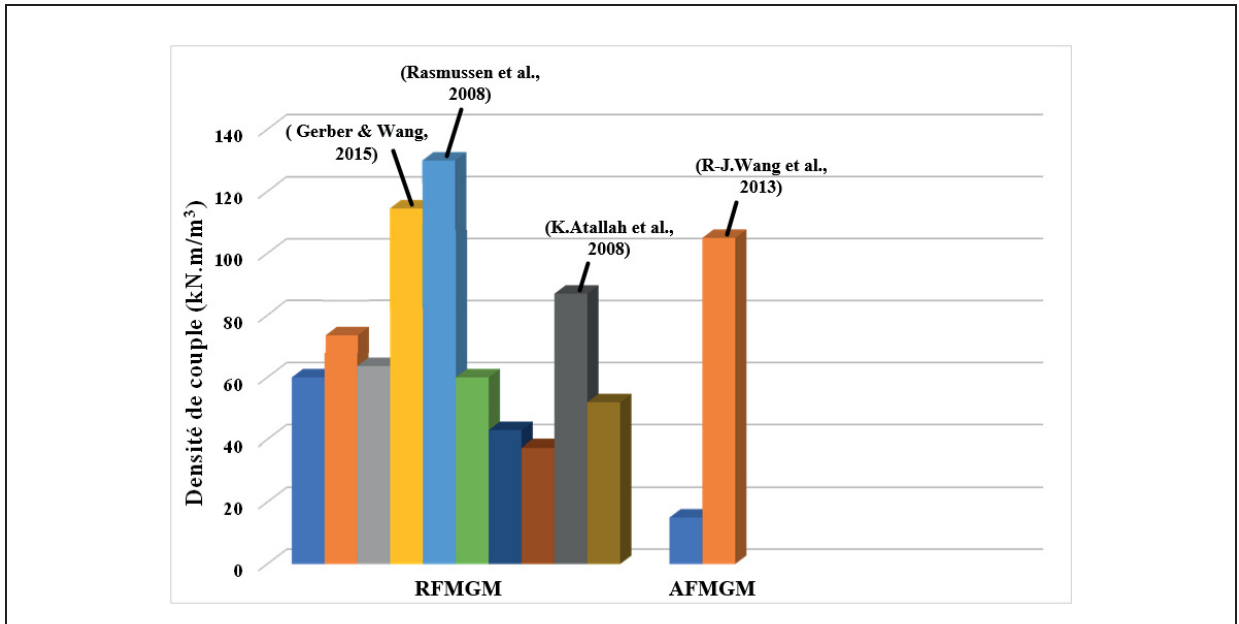


Figure 1.25 État général de la densité de couple de différents types de machines à engrenages magnétiques

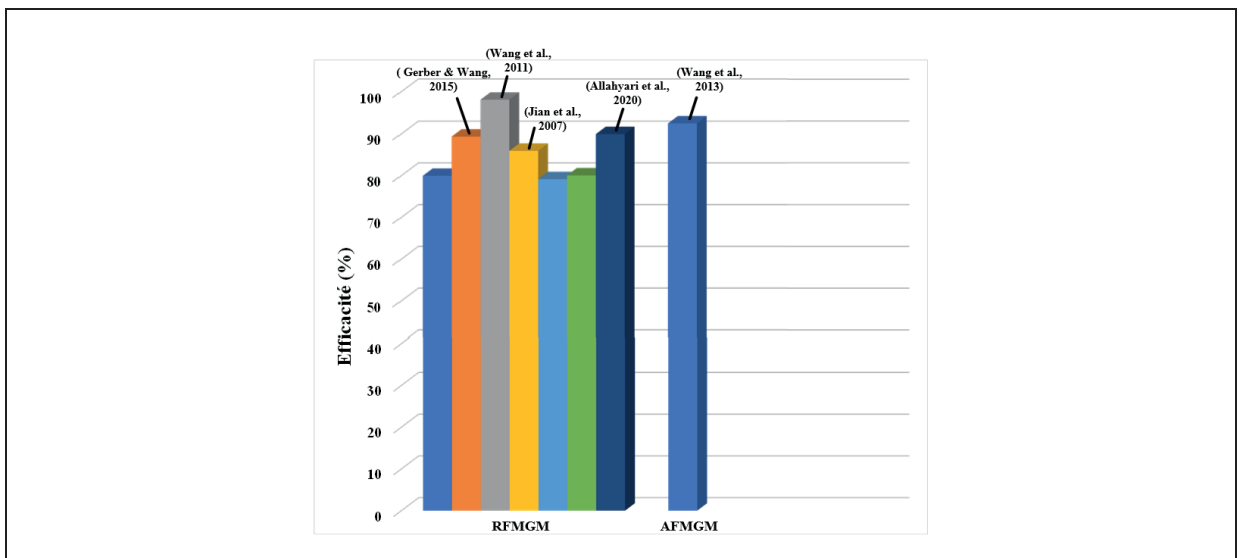


Figure 1.26 État général de l'efficacité de différents types de machines à engrenages magnétiques

La figure 1.25 montre que la densité de couple la plus élevée est obtenue par un RFMGM et est de  $130 \text{ kNm/m}^3$ . Comme présenté à la figure 1.26, les MGM ont dans l'ensemble une efficacité de transmission élevée (supérieur à 80 %).

## **1.6 Conclusion de la revue de littérature**

Ce chapitre passe en revue les différentes topologies des engrenages magnétiques tels que les RF-CMG, les AFMG, les TF-CMG, les SPM-CMG, les IPM-CMG, les FF-CMG, les HPM-CMG, R-CMG et des machines à engrenages magnétiques tels que les RFMGM et les AFMGM. Les avantages et les limites de chaque topologie sont discutés et comparés afin de fournir une orientation précise pour la conception d'un CMG et d'une MGM. Il ressort de cette étude que les topologies de MG et de MGM les plus adaptées aux objectifs de recherche sont le FF-CMG, le HPM-CMG et le AFMGM en raison de leur densité de couple élevée, de leur faible ondulation de couple et de leur structure simple à construire.

## CHAPITRE 2

### FONDEMENTS MATHÉMATIQUES ET MÉTHODOLOGIE DE RÉOLUTION

Dans ce chapitre, il est présenté dans un premier temps les fondements mathématiques de l'engrenage magnétique, ensuite une description de l'outil de recherche est effectuée et pour finir une description détaillée des étapes suivies pour atteindre les objectifs fixés est présentée à la section 2.3.

#### 2.1 Fondements mathématiques de l'engrenage magnétique

Le MG est basé sur des principes physiques liés au magnétisme. Les fondements mathématiques du MG sont étudiés dans cette section afin d'analyser et de modéliser son comportement.

##### 2.1.1 Principe de fonctionnement de l'engrenage magnétique

Le principe de fonctionnement du MG est basé sur la modulation par les pièces polaires ferromagnétiques des champs magnétiques produits par les réseaux d'aimants situés sur les rotors à grande et à petite vitesse (Rens et al., 2008). L'interaction des harmoniques spatiales qui proviennent des champs magnétiques et qui correspondent respectivement au nombre de pôles du rotor à petite et à grande vitesse contribue à la transmission du couple du MG.

La distribution du flux magnétique au niveau des CMG radiaux se fait selon une distance radiale  $r$  et  $\theta$  un angle créé par le rotor à grande ou à petite vitesse. La distribution de la densité de flux magnétique sans les pièces polaires ferromagnétiques est donnée par l'équation suivante (Atallah et al., 2004) :

$$B_{rA}(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos(mp(\theta - \Omega_{1,3}t) + mp\theta_0) \quad (2.1)$$

et la fonction de modulation est :

$$B_{rB}(r, \theta) = \lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3\dots} \lambda_{rj}(r) \cos(jn_s(\theta - \Omega_s t)) \quad (2.2)$$

La distribution de la densité de flux magnétique selon la distance radiale  $r$  peut s'écrire comme suit :

$$B_r(r, \theta) = B_{rA}(r, \theta) \times B_{rB}(r, \theta) \quad (2.3)$$

De même pour la distribution de la densité de flux circonférentielle, nous pouvons écrire :

$$B_{\theta A}(r, \theta) = \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin(mp(\theta - \Omega_{1,3} t) + mp\theta_0) \quad (2.4)$$

$$B_{\theta B}(r, \theta) = \lambda_{\theta 0}(r) + \sum_{j=1,2,3\dots} \lambda_{\theta j}(r) \cos(jn_s(\theta - \Omega_s t)) \quad (2.5)$$

$$B_{\theta}(r, \theta) = B_{\theta A}(r, \theta) \times B_{\theta B}(r, \theta) \quad (2.6)$$

où  $p$  est le nombre de paires de pôles sur un rotor à aimants permanents,  $n_s$  est le nombre de pièces de polaires ferromagnétiques,  $\Omega_{1,3}$  est la vitesse de rotation du rotor à aimants permanents et  $\Omega_s$  est la vitesse de rotation du modulateur de flux.  $b_{rm}$  et  $b_{\theta m}$  sont respectivement les coefficients de Fourier pour la distribution radiale et circonférentielle de la densité de flux sans les pièces polaires ferromagnétiques.  $\lambda_{rj}$  et  $\lambda_{\theta j}$  représentent respectivement les coefficients de Fourier pour la composante radiale et circonférentielle de la distribution de la densité de flux liés à l'introduction des pièces polaires ferromagnétiques. En substituant les équations 2.1 et 2.2, l'équation 2.3 peut s'écrire comme suit :



$$\begin{aligned}
B_r(r, \theta) = & \lambda_{r0} \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos(mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0) \\
& + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) \cos \\
& \left( (mp + jn_s) \left( \theta - \frac{(mp\Omega_r + jn_s\Omega_s)}{(mp - jn_s)} t \right) + mp\theta_0 \right) \\
& + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) b_{rm}(r) \cos \\
& \left( (mp - jn_s) \left( \theta - \frac{(mp\Omega_{1,3} + jn_s\Omega_s)}{(mp - jn_s)} t \right) + mp\theta_0 \right)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

En substituant les équations 2.4 et 2.5, l'équation 2.6 peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}
B_r(r, \theta) = & \lambda_{\theta 0} \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin(mp(\theta - \Omega_{1,3} t) + mp\theta_0) \\
& + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) b_{\theta m}(r) \sin \\
& \left( (mp + jn_s) \left( \theta - \frac{(mp\Omega_{1,3} + jn_s\Omega_s)}{(mp - jn_s)} t \right) + mp\theta_0 \right) \\
& + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) b_{\theta m}(r) \sin \\
& \left( (mp - jn_s) \left( \theta - \frac{(mp\Omega_{1,3} + jn_s\Omega_s)}{(mp - jn_s)} t \right) + mp\theta_0 \right)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Les équations 2.3 et 2.6 permettent de déduire que le nombre de paires de pôles dans la distribution de densité de flux harmonique spatiale produite par le rotor à grande ou à petite vitesse est donné par :

$$\begin{aligned}
p_{m,k} &= |mp + kn_s| \\
m &= 1,3,5, \dots, \infty \\
k &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty
\end{aligned}
\tag{2.9}$$

et la vitesse angulaire correspondante de chaque harmonique spatiale est donnée par l'équation suivante :

$$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s} \Omega_{1,3} + \frac{kn_s}{mp + kn_s} \Omega_s
\tag{2.10}$$

Dans l'équation 2.8, il est possible de remarquer que la vitesse angulaire des harmoniques spatiales dues à l'introduction des pièces polaires ferromagnétiques ( $k \neq 0$ ) est différente de celle du rotor à aimants permanents. Par conséquent, pour transmettre un couple à une vitesse angulaire différente, le nombre de paires de pôles du second rotor à aimants permanents devra être égal au nombre de paires de pôles d'une harmonique spatiale pour laquelle ( $k \neq 0$ ).

L'étude sur les deux topologies de CMG à réluctance (R-CMG) présentée à la figure 1.11 révèle que le R-CMG fonctionne différemment par rapport aux autres CMG. En effet, contrairement aux CMG conventionnels, dans le R-CMG, l'effet de modulation des champs magnétiques produit par les rotors intérieurs et extérieurs est assuré par le rotor à pôles saillants. La distribution du flux magnétique radial est donnée comme suit :

$$\begin{aligned}
B_a(r) = & \sum_{m=1,3,5}^{+\infty} b_0^m(r) \cos[mp_s(\theta + \alpha_0^m)] \\
& + \sum_m^{+\infty} \sum_k^{\pm\infty} b_r^{m,k} \cos \left[ \begin{array}{l} (mp_s + kn_{lr}) \times \\ \left( \theta - \frac{kn_{lr}\Omega_{lr}}{mp_s + kn_{lr}} \right) \\ + mp_s \alpha_0^m + kn_{lr}\beta_0^m \end{array} \right] \\
& + \sum_m^{+\infty} \sum_k^{\pm\infty} b_r^{m,k} \cos \left[ \begin{array}{l} (mp_s - kn_{lr}) \times \\ \left( \theta + \frac{kn_{lr}\Omega_{lr}}{mp_s + kn_{lr}} \right) \\ + mp_s \alpha_0^m - kn_{lr}\beta_0^m \end{array} \right]
\end{aligned} \tag{2.11}$$

où  $\alpha_0^m$  et  $\beta_0^m$  sont respectivement l'angle de phase initial des pièces polaires ferromagnétiques et du rotor à pôles saillants,  $b_0^m$  et  $b_r^{m,k}$  sont les coefficients de Fourier,  $p$  et  $n_{lr}$  sont respectivement le nombre de paires de pôles sur le rotor PM et le nombre de pôles saillants du noyau stationnaire,  $t$  et  $\theta$  sont respectivement le temps et la position du rotor PM, et  $\Omega_{lr}$  est la vitesse angulaire du rotor à basse vitesse. Selon l'équation 2.11, la densité de flux radiale dans l'entrefer intérieur consiste en une série d'harmoniques spatiales exprimées comme suit :

$$\begin{aligned}
p_{m,k} &= |mp_s + kn_{lr}| \\
m &= 1,3,5, \dots, +\infty \\
k &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm\infty
\end{aligned} \tag{2.12}$$

la vitesse angulaire correspondante de chaque harmonique spatiale est donnée par l'équation suivante :

$$\Omega_{m,k} = \frac{kn_{lr}}{mp_s + kn_{lr}} \Omega_{lr} \tag{2.13}$$

où  $\Omega_{m,k}$  est la vitesse angulaire de l'harmonique spatiale correspondante. Comme le montre l'équation 2.13, contrairement au CMG conventionnel, les rotors du R-CMG tournent dans le même sens. La plus grande harmonique est obtenue lorsque  $m$  et  $k$  sont respectivement égales à 1 et -1. Le couple de sorties le plus élevé est donc obtenu lorsque le nombre de

paires de pôles du rotor à grande vitesse est égal à  $|p_s - n_{lr}|$ . Par conséquent, le rapport d'engrenage de MG peut être exprimé comme suit :

$$G_r = \frac{\Omega_h}{\Omega_l} = \frac{n_{lr}}{n_{lr} + p_s} \quad (2.14)$$

### 2.1.2 Choix du rapport d'engrenage magnétique

Le choix du rapport de MG est un facteur très important, car il influence directement les performances du CMG. Des études réalisées sur différents CMG ont montré qu'une augmentation du rapport d'engrenage et de la vitesse de rotation entraîne respectivement une diminution de la densité de couple et de l'efficacité du CMG (Atallah et al., 2004; Johnson et al., 2017). Un rapport d'engrenage fractionnaire permet d'avoir une meilleure flexibilité de la transmission de couple, une meilleure précision de la vitesse de sortie et une réduction de l'ondulation de couple (Frank & Toliyat, 2009). En se basant sur tout ce qui précède, le choix de  $p_1 = 4$  paires de pôles,  $p_3 = 22$  paires de pôles et de  $n_s = 26$  pièces polaires ferromagnétiques sont faites respectivement au niveau du rotor à haute vitesse, à faible vitesse et au niveau du rotor à cage. Le rotor à cage est capable de moduler le flux de l'entrefer et de réaliser un couplage efficace entre le rotor intérieur et extérieur. La relation qui existe entre les vitesses angulaires des différentes parties du MG est donnée par l'équation suivante (Atallah & Howe, 2001; Uppalapati & Bird, 2012).

$$\Omega_1 p_1 + \Omega_3 p_3 = \Omega_s n_s \quad (2.15)$$

où  $\Omega_1$ ,  $\Omega_3$  et  $\Omega_s$  sont respectivement les vitesses angulaires du rotor interne (grande vitesse), du rotor externe (faible vitesse) et du rotor à cage.

La relation entre les paires de pôles et les pièces polaires ferromagnétiques est donnée par l'équation suivante :

$$n_s = p_1 + p_3 \quad (2.16)$$

Le calcul du rapport d'engrenage se fait en fonction du mode de fonctionnement du CMG. Pour atteindre la densité de couple maximale, le rotor à faible vitesse est fixé ( $\Omega_3 = 0$ ), tout en laissant tourner les deux autres parties. Le rapport d'engrenage peut être calculé comme suit :

$$G_r = \frac{n_s}{p_1} = 6.5 \quad (2.17)$$

### 2.1.3 Facteur de cogging

Le facteur de cogging ou couple de cogging tire son origine de la structure physique du MG. Il produit par interaction entre les aimants permanents des rotors et les pièces polaires ferromagnétiques un couple irrégulier. Celui-ci est responsable des vibrations et du bruit acoustique indésirable observés au niveau des CMG. Le facteur de cogging est introduit afin de mesurer la qualité de fonctionnement du CMG. En effet, plus le facteur de cogging est élevé et plus le couple de cogging est important. Plusieurs techniques sont proposées dans la littérature afin de le minimiser (Zaytoon et al., 2014). Le facteur de cogging peut être calculé comme suit :

$$N_c = PPCM(2p, n_s) \quad (2.18)$$

et

$$C_T = \frac{2pn_s}{N_c} \quad (2.19)$$

où  $N_c$  est le plus petit multiple commun,  $p$  est le nombre de paires de pôles du rotor et  $n_s$  est le nombre de pièces polaires ferromagnétiques.

### 2.1.4 Rapport de focalisation de flux

Le rapport de focalisation de flux est un rapport spécifique aux MG qui utilisent la technologie de focalisation de flux (FF). Il permet de mesurer l'efficacité de transmission de couple des FF-CMG et est défini comme le rapport entre la densité de flux magnétique à la surface de contact des aimants du rotor et la densité de flux dans la zone d'air entre les aimants (Acharya et al., 2014; Uppalapati et al., 2012). Les rapports de concentrations de flux au niveau du rotor à grande et basse vitesse sont donnés par les équations suivantes :

$$C_1 = \frac{B_{g1}}{B_{m1}} = \frac{2}{\theta_{ari}} \left[ 1 - \frac{r_{i1}}{r_{r2}} \right] \quad (2.20)$$

et

$$C_3 = \frac{B_{g3}}{B_{m3}} = \frac{2}{\theta_{prc}} \left[ \frac{r_{e3}}{(r_{r2} + I_{rc})} - 1 \right] \quad (2.21)$$

où  $B_{g1}$  est la densité de flux de la pièce d'acier du rotor à grande vitesse,  $B_{m1}$  est la densité de l'aimant du rotor à grande vitesse,  $B_{g3}$  est la densité de flux de la pièce d'acier du rotor à basse vitesse,  $B_{m3}$  est la densité de flux de l'aimant du rotor à basse vitesse.

### 2.1.5 Densité de couple volumétrique

La densité de couple volumétrique (VTD) représente la quantité de couples par unité de volume. Elle peut être calculée par l'équation suivante :

$$VTD = \frac{T}{V_{MG}} \quad (2.22)$$

où  $T$  est le couple maximum que peut atteindre le MG et  $V_{MG}$  son volume.

### 2.1.6 Couple par volume d'aimants permanents

Le couple par unité de volume de PM (TPMV) peut être calculé par l'équation suivante :

$$TPMV = \frac{T}{V_{PM}} \quad (2.23)$$

où  $T$  est le couple maximum atteint par le MG et  $V_{PM}$  le volume des PM.

### 2.1.7 Ondulation de couple

L'ondulation de couple représente la variation du couple produit par le MG en rotation. Elle peut être calculée par l'équation suivante :

$$\Delta T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_m} \quad (2.24)$$

où  $T_{max}$  est le couple maximum atteint par le MG,  $T_{min}$  est le couple minimum atteint et  $T_m$  le couple moyen.

### 2.1.8 Pertes lors de la transmission du couple

Les principales pertes au niveau du CMG sont les pertes de fer et les pertes par courants de Foucault. Ces pertes sont dues en grande partie aux sous harmoniques générés par les champs magnétiques des PM situés sur le rotor intérieur et extérieur du CMG (Tian et al., 2015). Les pertes de fer peuvent être calculées comme suit (Tian et al., 2015) :

$$W_{fer} = \sum_n \left( \int_{fer} (A_e(nf)^2 B_m^2 + A_h(nf) B_m^2) dv \right) \quad (2.25)$$

où  $f$  est la fréquence du flux,  $B_m$  est la densité de flux harmonique,  $A_h$  et  $A_e$  sont respectivement les coefficients d'hystérésis et de perte par courant de Foucault.

Les pertes par courants de Foucault dans les aimants [PM] sont calculées comme suit :

$$W_{PM} = \sum_n \left( \int_{PM} \frac{|J_n|^2}{2\sigma} dv \right) \quad (2.26)$$

où  $J_n$  et  $\sigma$  sont respectivement l'amplitude de la  $n^{\text{ième}}$  harmonique temporelle des courants de Foucault et la conductivité.

Les pertes par courants de Foucault sont généralement plus élevées que les pertes fer. Les pertes fer les plus élevées sont localisées au niveau des pièces polaires ferromagnétiques. L'adoption de l'acier laminé est proposée afin d'améliorer l'efficacité de l'engrenage magnétique (Desvaux et al., 2017; Zanis et al., 2014).

L'efficacité de l'engrenage magnétique peut être calculée comme suit :

$$P_{entrée} = P_{sortie} + P_{pertes} \quad (2.27)$$

et

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} \quad (2.28)$$

où  $\eta$  est l'efficacité,  $P_{sortie}$  est la puissance de sortie,  $P_{entrée}$  est la puissance d'entrée et  $P_{pertes}$  est la somme des pertes de l'engrenage magnétique (CMG).

Dans ce présent mémoire, la méthode d'analyse utilisée est l'analyse par éléments finis (en anglais *Finite Element Analysis* ou FEA). Le logiciel utilisé pour concevoir et simuler le CMG et la MGM est Ansys Maxwell.



## 2.2 Présentation de l'outil de recherche

Ansys Maxwell est un logiciel de la suite ANSYS qui utilise l'analyse par éléments finis (FEA 2D ou 3D) pour résoudre des problèmes électriques ou magnétiques. Il permet la conception et l'analyse des systèmes électromagnétiques tels que les moteurs, les transformateurs, les générateurs, les circuits imprimés, les antennes, les systèmes de transmission sans fil, etc.

### 2.2.1 Méthode des éléments finis dans Ansys Maxwell

La méthode des éléments finis (FEM) est une technique numérique basée sur la résolution des équations de Maxwell dans une région finie de l'espace (tétraèdre) avec des conditions aux limites appropriées et des conditions initiales spécifiées par un utilisateur. En outre, elle permet de calculer les performances électromagnétiques des machines en évaluant les champs magnétiques de celles-ci. Les équations de Maxwell peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0\end{aligned}\tag{2.29}$$

où  $\nabla$  est la dérivée partielle en trois dimensions,  $H$  est le champ magnétique,  $J$  est la densité de courant,  $D$  est le vecteur de déplacement électrique,  $E$  est le champ électrique,  $B$  est la densité de flux magnétique et  $\rho$  est la densité volumique de charge.

### 2.2.2 Présentation de l'interface d'Ansys Maxwell

L'interface d'Ansys Maxwell comme présenté à la figure 2.1 est constituée de neuf (9) parties : une barre de menu qui permet d'accéder à toutes les fonctionnalités du logiciel, une

barre d'outils, une fenêtre de gestion de projet qui contient les détails de la configuration des contraintes et conditions aux limites affectées au projet, un arbre de l'historique qui contient les détails de toutes les opérations géométriques effectuées, une fenêtre des propriétés qui affiche les propriétés des différents éléments utilisés pour la conception du modèle, une fenêtre du modélisateur qui permet de visualiser la géométrie du modèle, une fenêtre de message, une fenêtre de progression qui affiche la progression de la simulation du modèle, une barre d'état et un champ de saisie des coordonnées (Maxwell).

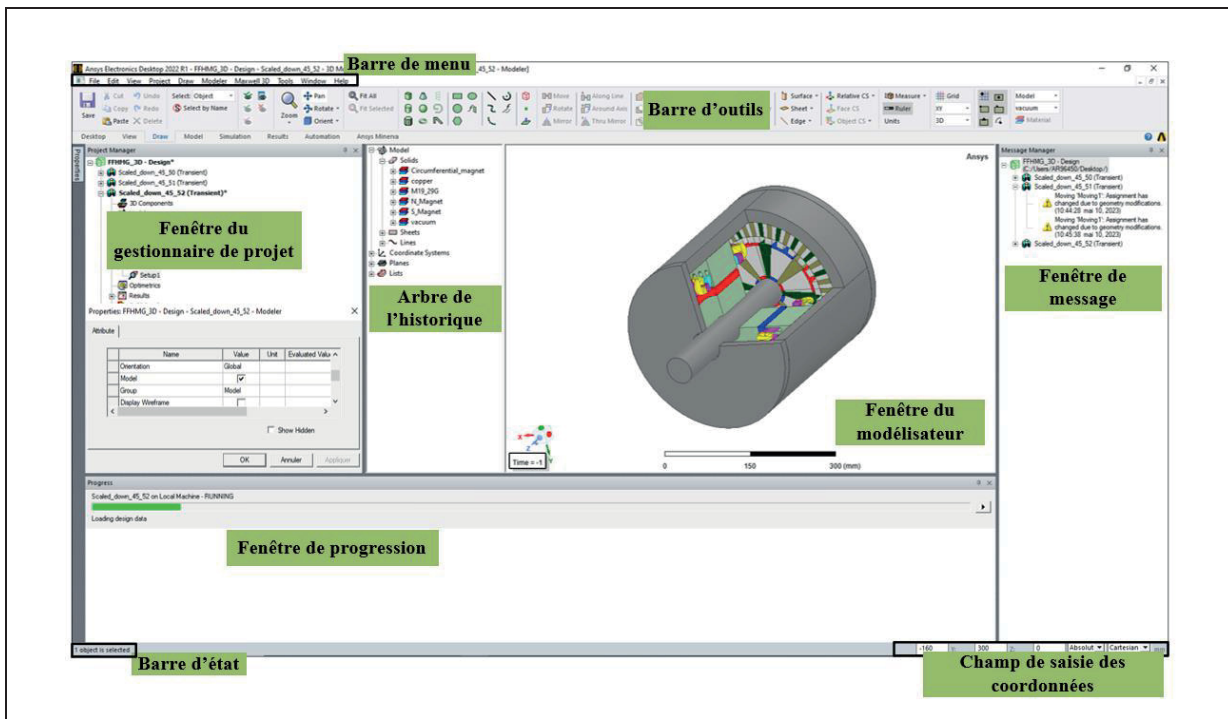


Figure 2.1 Interface d'Ansys Maxwell

### 2.3 Choix de la topologie et méthode d'optimisation

La MGM est une machine électrique qui intègre un MG. Le MG joue un rôle essentiel dans le fonctionnement global de la MGM. L'étude effectuée dans le chapitre 1 permet de déterminer les topologies, les plus adaptées aux objectifs de recherche fixés. Ces topologies sont : le FF-CMG, le HPM-CMG et le AFMGM. En effet, Le FF-CMG et le HPM-CMG ont une structure qui permet d'atteindre une densité de couple élevée tout en présentant une

faible ondulation de couple. Afin de profiter des avantages offerts par ces deux topologies, un CMG hybride qui combine une disposition particulière du réseau d'aimants halbach et la technique de focalisation de flux respectivement sur le rotor intérieur et extérieur est conçu. Le logiciel Ansys Maxwell est utilisé pour faire la conception de ce CMG. Les paramètres clés de conception sont ensuite déterminés à partir des études antérieures réalisées sur ces deux types de topologies. Parmi ceux-ci, il est possible de citer les dimensions de la pièce polaire ferromagnétique (longueur et portée), les dimensions des aimants du rotor intérieur et extérieur (longueur et portée). La méthode d'optimisation choisie pour optimiser le CMG est la méthode par balayage de paramètres. Cette méthode dans le cadre de ce mémoire consiste à simuler différentes combinaisons de valeurs de paramètres clés de conception. Ces données sont ensuite utilisées pour tracer des courbes 3D avec le logiciel Matlab afin de déterminer le modèle optimisé du CMG hybride. Le modèle optimisé est ensuite analysé par FEA 2D et 3D dans le mode de fonctionnement à l'arrêt et en régime permanent afin de valider les résultats de l'optimisation. Par la suite, un moteur SPM conçu de telle sorte à être adapté à la taille du CMG hybride optimisé est couplé axialement à celui-ci pour former la AMGM proposée. La AMGM proposée est ensuite analysée par FEA 3D pour évaluer sa performance.



## CHAPITRE 3

### PRÉSENTATION ET VALIDATION DU MODÈLE OPTIMISÉ DE L'ENGRENAGE MAGNÉTIQUE HYBRIDE

Dans ce chapitre, le MG proposé est présenté, optimisé et validé par l'analyse par éléments finis (FEA) en 2D et 3D. Une comparaison entre le FFH-CMG et ses homologues est ensuite établie afin de mesurer l'apport de cette nouvelle structure proposée.

#### 3.1 Proposition de l'engrenage magnétique coaxial hybride

Cette section présente le FFH-CMG (en anglais *Flux Focusing Halbach Coaxial Magnetic Gear*) conçu à l'aide d'Ansys maxwell 2D et 3D. La technique de focalisation de flux (FF) et le réseau d'aimants permanents halbach (HPM) sont utilisés afin d'atteindre une densité de couple élevée. Il est inséré dans un premier temps des aimants PM à magnétisation circumférentielle dans le rotor extérieur du CMG pour réaliser la technique de focalisation de flux. Cela permet d'améliorer la densité de flux de l'entrefer et d'obtenir un couple de sortie important. Ensuite, un réseau particulier de PM halbach est inséré comme le montre la figure 3.1 dans le rotor intérieur. Cela permet de réduire le flux de fuite lié à l'utilisation de la technique de focalisation de flux, d'améliorer la densité de flux de l'entrefer et d'augmenter ainsi la densité de couple du FF-CMG (Uppalapati et al., 2014). La figure 3.2 illustre la disposition des aimants au niveau du rotor intérieur et extérieur. Les flèches à l'intérieur des matériaux de l'aimant permettent de distinguer la direction de magnétisation de ceux-ci. Les aimants rouge, bleu, vert et jaune verdâtre produisent respectivement des lignes de flux dans les directions radiales positives, radiales négatives, circumférentielles positives et circumférentielles négatives. La disposition unique des aimants rouges et bleus permet d'obtenir une distribution plus sinusoïdale et plus lisse des lignes de flux situées dans l'entrefer. En se basant sur la section 2.1.2, un rapport d'engrenage de 6.5 est obtenu.

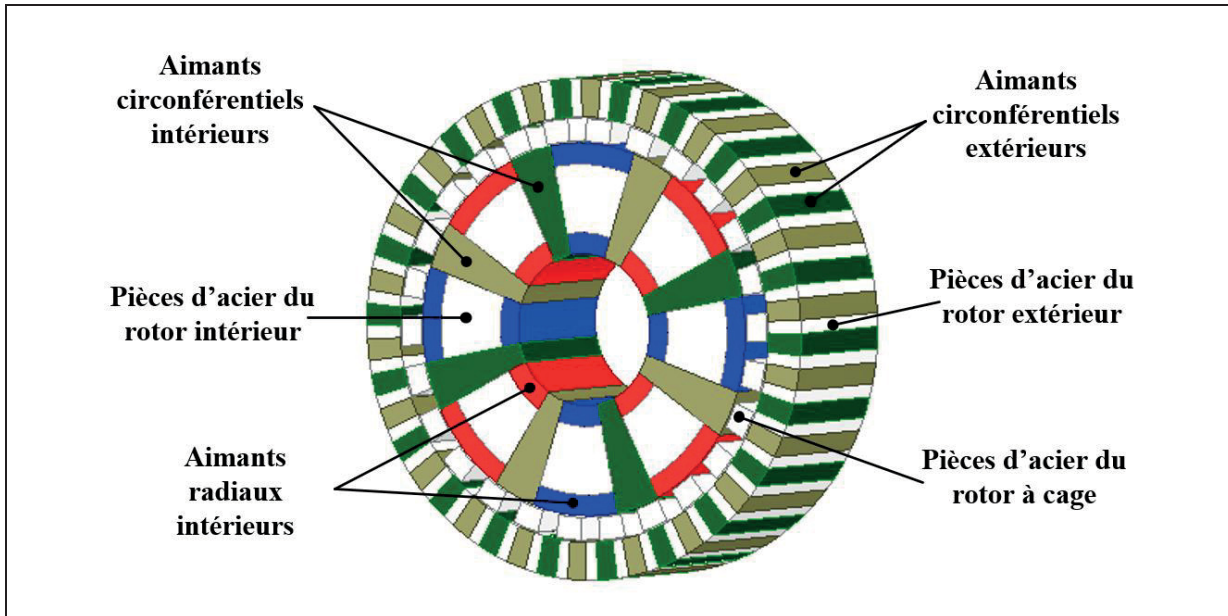


Figure 3.1 Configuration de l'engrenage magnétique hybride proposée

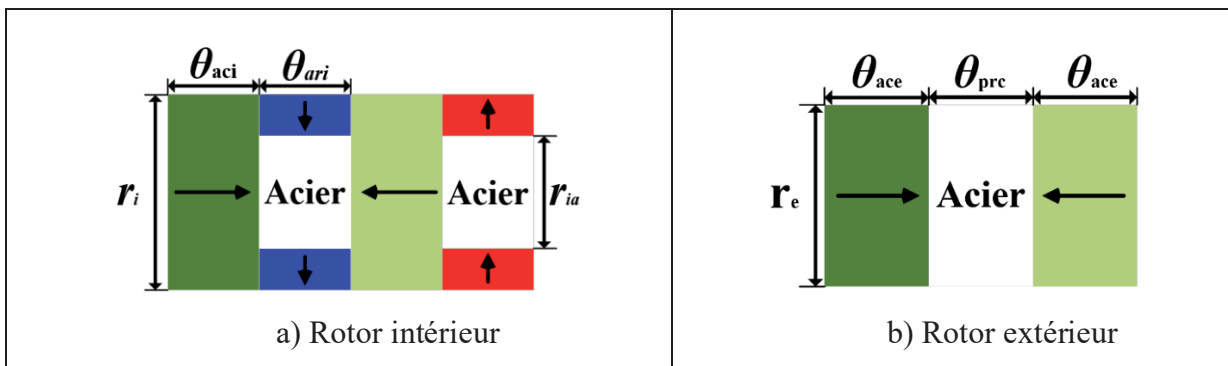


Figure 3.2 Dispositions proposées pour les aimants permanents

### 3.1.1 Optimisation du CMG hybride proposé

Les paramètres géométriques du FFH-CMG proposé sont optimisés à l'aide de la méthode par balayage de paramètres et ensuite analysés par FEA 2D afin d'obtenir des résultats optimaux de la densité de couple volumétrique (en anglais *Volumetric Torque Density* ou VTD) et du couple par unité de volume de PM (en anglais *Torque per PM Volume* ou TPMV). Cela permet d'établir un modèle de simulation du FFH-CMG et de le valider ensuite par FEA 3D.

### 3.1.1.1 Optimisation par balayage des paramètres géométriques

L'optimisation par balayage des paramètres géométriques consiste à explorer une grille de valeurs des paramètres géométriques clés afin de trouver une combinaison qui maximise la densité de couple volumétrique tout en maximisant également le couple par unité volume de PM du FFH-CMG. La figure 3.3 montre les paramètres géométriques du MG proposé.

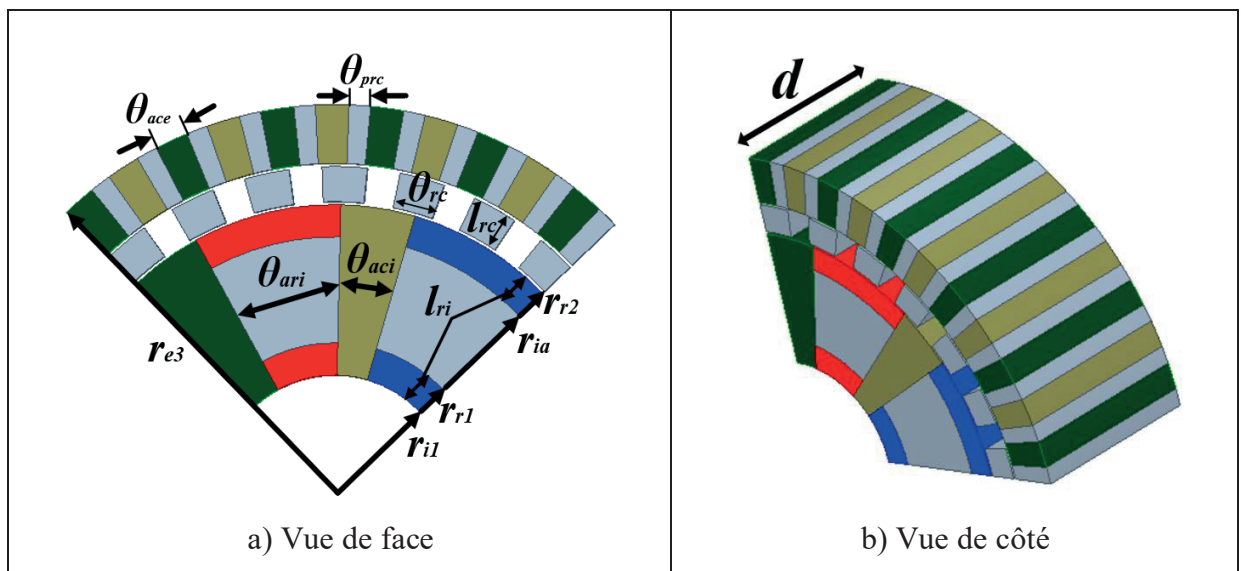


Figure 3.3 Paramètres géométriques du FFH-CMG proposé

Les paramètres  $\theta_{ari}$ ,  $\theta_{aci}$ ,  $\theta_{prc}$ , et  $\theta_{ace}$  sont respectivement les portées des aciers du rotor interne, les aimants du rotor interne, les aciers du rotor externe et les aimants du rotor externe. Le rayon intérieur du rotor à grande vitesse ( $r_{i1} = 25$  mm) et le rayon extérieur du rotor à faible vitesse ( $r_{e3} = 135$  mm) sont maintenus fixes pendant l'optimisation pour que le volume total du FFH-CMG reste constant (Rens et al., 2008). En outre, la longueur radiale des aimants sur les bords intérieurs et extérieurs du rotor à grande vitesse est considérée comme égale pendant le processus d'optimisation. Par conséquent, la condition suivante est toujours respectée tout au long du processus de balayage des paramètres :

$$l_{ri} = r_{r1} - r_{i1} = r_{r2} - r_{ia} \quad (3.1)$$

Le processus d'optimisation débute par un balayage paramétrique de l'épaisseur axiale ( $I_{rc}$ ) et de la portée des barres ( $\theta_{rc}$ ) du rotor à cage. Les intervalles choisis sont de 10 mm à 20 mm avec un pas de 1 mm et de 5 mm à 9.5 mm avec un pas de 0.5 mm respectivement pour  $I_{rc}$  et  $\theta_{rc}$ . L'optimisation est ensuite poursuivie par le balayage des aimants radiaux ( $I_{ri}$ ) et de la portée des aimants ( $\theta_{aci}$ ). Les intervalles choisis sont de 2 mm à 12 mm avec un pas de 1 mm et de 14.5 mm à 19 mm avec un pas de 0.5 mm respectivement pour  $I_{ri}$  et  $\theta_{aci}$ . Cela permet de déterminer les paramètres géométriques optimaux permettant au modèle de fournir la densité de couple volumétrique et le couple par unité de volume de PM les plus élevés possibles. Pendant le balayage paramétrique, le volume total et la longueur de l'entrefer du FFH-CMG sont maintenus fixes. En d'autres termes, lorsque  $I_{rc}$  augmente, les longueurs radiales des rotors intérieurs et extérieurs sont réduites dans la même proportion pour maintenir le volume constant.

### **3.2 Résultats de l'optimisation**

Les données collectées de l'optimisation présentée à la section 3.1.1.1 sont utilisées pour tracer les courbes 3D Matlab présentées à la figure 3.4 afin d'avoir un aperçu global.



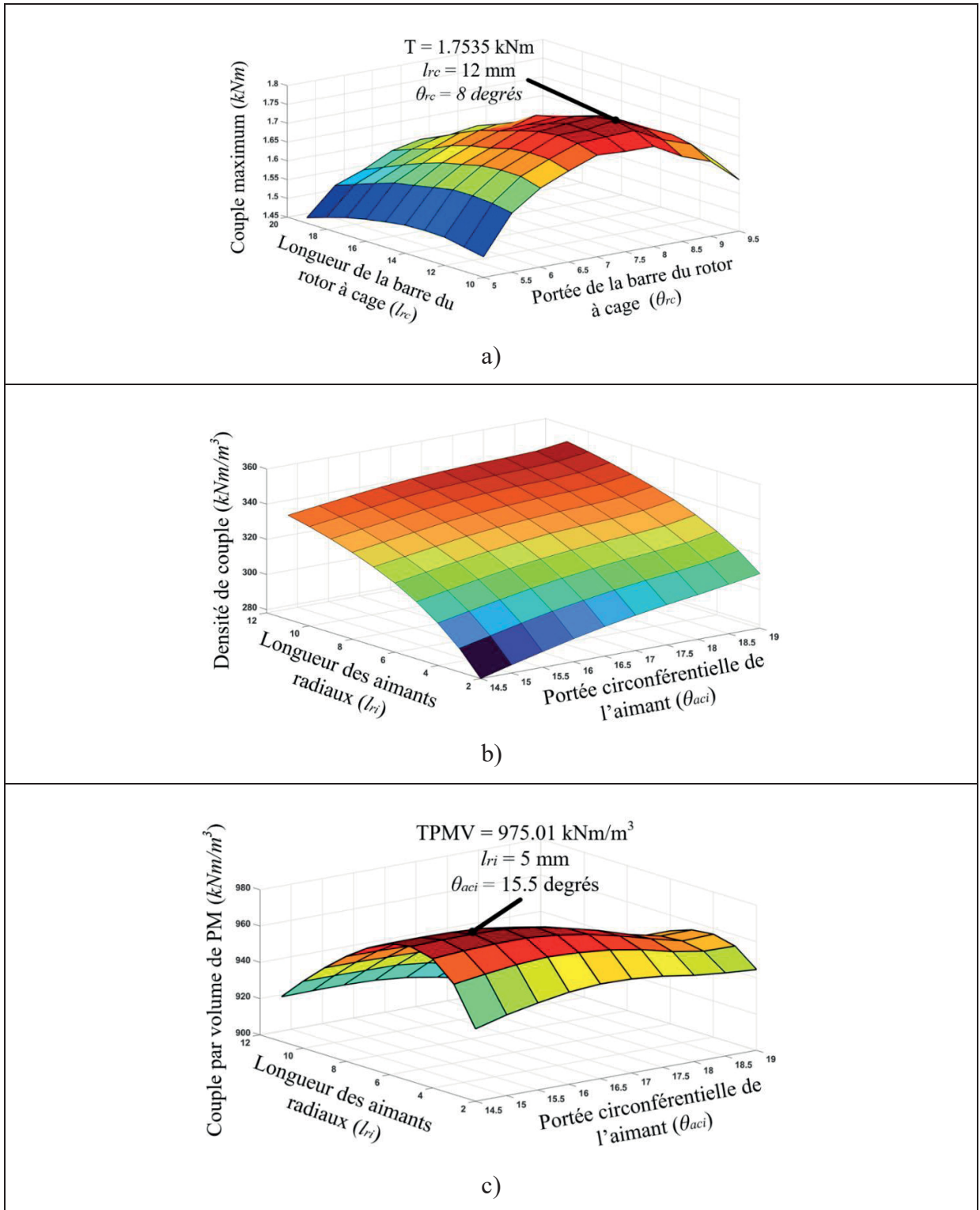


Figure 3.4 Évaluation du balayage des paramètres du FFH-CMG proposé

Le premier balayage paramétrique effectué est présenté à la figure 3.4.(a) et permet de remarquer qu'un couple de décrochage maximal de 1.7535 kNm peut être atteint lorsque  $\theta_{rc}$  et  $I_{rc}$  sont respectivement égales à  $8^\circ$  et à 12 mm. Un second balayage est également effectué afin de déterminer les valeurs optimales de l'épaisseur des aimants radiaux ( $I_{ri}$ ) et de la portée des barres des aimants circonférentiels ( $\theta_{aci}$ ), les résultats de celui-ci sont présentés à la figure 3.4.(b) Il est possible de remarquer sur cette figure que le couple maximal du FFH-CMG augmente avec l'augmentation de  $I_{ri}$  et de  $\theta_{aci}$ . Cela est dû à l'augmentation du volume des aimants PM. Cependant, en raison du coût élevé des PM, un troisième balayage présenté à la figure 3.4.(c) est effectué afin de déterminer les valeurs optimales de  $I_{ri}$  et de  $\theta_{aci}$ . Il est possible d'observer qu'un TPMV maximal de 975.01 kNm/m<sup>3</sup> est obtenu lorsque  $I_{ri}$  et  $\theta_{aci}$  sont respectivement égales à 5 mm et à  $15.5^\circ$ . De ces résultats sont déterminés un modèle optimisé du FFH-CMG dont les paramètres géométriques sont résumés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Paramètres géométriques du FFH-CMG et propriétés des matériaux

	<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
<b>Rotor intérieur</b>	Paires de pôles, $p_l$	4	-
	Rayon intérieur, $r_{il}$	25	mm
	Rayon extérieur, $r_{el}$	94.5	mm
	Portée circonférentielle de l'aimant, $\theta_{aci}$	15.5	degré
	Portée du pôle en acier, $\theta_{ari}$	29.5	degré
	Rayon extérieur de l'aimant radial, $r_{rl}$	30	mm
	Longueur de l'entrefer, $g_l$	0.5	mm
<b>Rotor à cage</b>	Pièces polaires en acier, $n_s$	26	-
	Portée d'une pièce polaire en acier, $\theta_{rc}$	8	degré
	Longueur du pôle en acier, $l_{rc}$	12	mm
<b>Rotor extérieur</b>	Paires de pôles, $p_3$	22	-
	Rayon intérieur, $r_{i3}$	107.5	mm
	Rayon extérieur, $r_{e3}$	135	mm
	Portée circonférentielle de l'aimant, $\theta_{ace}$	$\pi/88$	rad
	Portée du pôle en acier, $\theta_{prc}$	$\pi/88$	rad
	Longueur de l'entrefer, $g_3$	0.5	mm
<b>Matériau</b>	Rémanence de l'aimant NdFeB, $B_r$	1.21	T
	Perméabilité de l'aimant NdFeB, $\mu$	1.05	H/m
	Densité de masse de l'acier M19_29G	7872	Kg/m <sup>3</sup>
Longueur de la pile, $d$		80	mm

### 3.3 Analyse des résultats de simulation

Cette section est consacrée à la validation du modèle optimisé obtenu à la section 3.2. Pour ce faire, un examen des performances électromagnétiques du MG optimisé est effectué à l'aide du FEA 2D et du FEA 3D.

#### 3.3.1 Densité de flux dans l'entrefer et analyse harmonique

L'étude de la densité de flux dans l'entrefer intérieur et extérieur adjacent au rotor à grande et à petite vitesse est effectuée afin d'analyser la répartition du flux magnétique dans ces deux zones du modèle optimisé du FFH-CMG lors de son fonctionnement à l'arrêt ( $\Omega_3=0$ ). Les formes d'ondes de la densité de flux radial de ces deux zones en fonction de la position du rotor à grande vitesse sont présentées respectivement aux figures 3.5.(a) et 3.5.(b). Il est possible de remarquer que l'amplitude de la densité de flux au niveau du rotor à grande vitesse (rotor intérieur) et à petite vitesse (rotor extérieur) atteint respectivement un pic de 2 T et 3 T. La quantité de flux magnétique qui traverse l'entrefer extérieur est donc plus importante que celle qui traverse l'entrefer intérieur. Cela est dû à la différence de configuration des PM entre le rotor intérieur et extérieur. En effet, comme expliqué à la section 3.1, la technique de focalisation de flux augmente la densité de flux dans l'entrefer. Le spectre harmonique correspondant à la densité de flux radial dans l'entrefer extérieur est également présenté à la figure 3.5.(c) Il est possible de constater que les harmoniques les plus dominantes sont la 4<sup>e</sup> et la 22<sup>e</sup> harmonique avec des valeurs d'amplitudes respectives de 0.4 pu et de 1 pu. Ces harmoniques correspondent au nombre de paires de pôles du rotor intérieur et du rotor extérieur. Elles contribuent, par leurs interactions, à la transmission du couple du rotor à grande vitesse au rotor à petite vitesse.

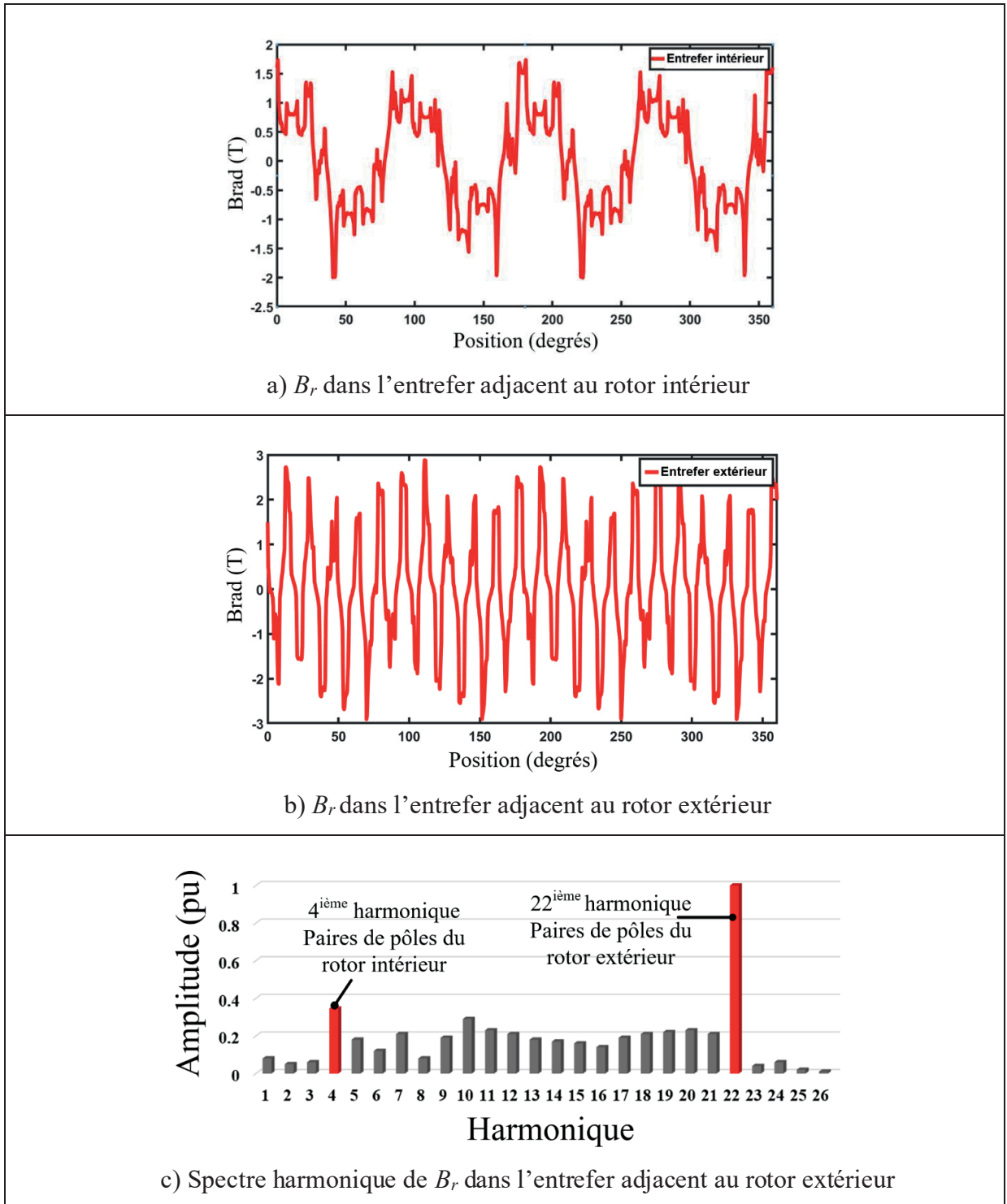


Figure 3.5 Densité de flux radial ( $B_r$ ) du FFH-CMG proposé

### 3.3.2 Distribution de flux et maillage

L'étude sur le maillage du FFH-CMG modélisé est effectuée afin de garantir la précision des résultats de l'optimisation. Le tracé de maillage est illustré à la figure 3.6.(b). Le maillage est fin et prend en compte toute la géométrie du FFH-CMG. Il est donc de bonne qualité. La distribution de flux magnétique à travers le FFH-CMG est présentée à la figure 3.6.(a). L'analyse de celle-ci montre une forte concentration du flux magnétique sur les pôles en acier du rotor à petite vitesse et dans l'entrefer extérieur. Cela est dû comme discuté précédemment à l'utilisation de la technique de focalisation de flux au niveau du rotor à petite vitesse. Il est possible d'observer également que les bords des segments du rotor à cage sont légèrement saturés. Cette saturation peut être toutefois supprimée en augmentant la portée du rotor à cage ( $\theta_{rc}$ ). La conséquence engendrée par cette augmentation est la réduction de l'effet modulant du rotor à cage entraînant ainsi une réduction du couple de sortie du FFH-CMG.

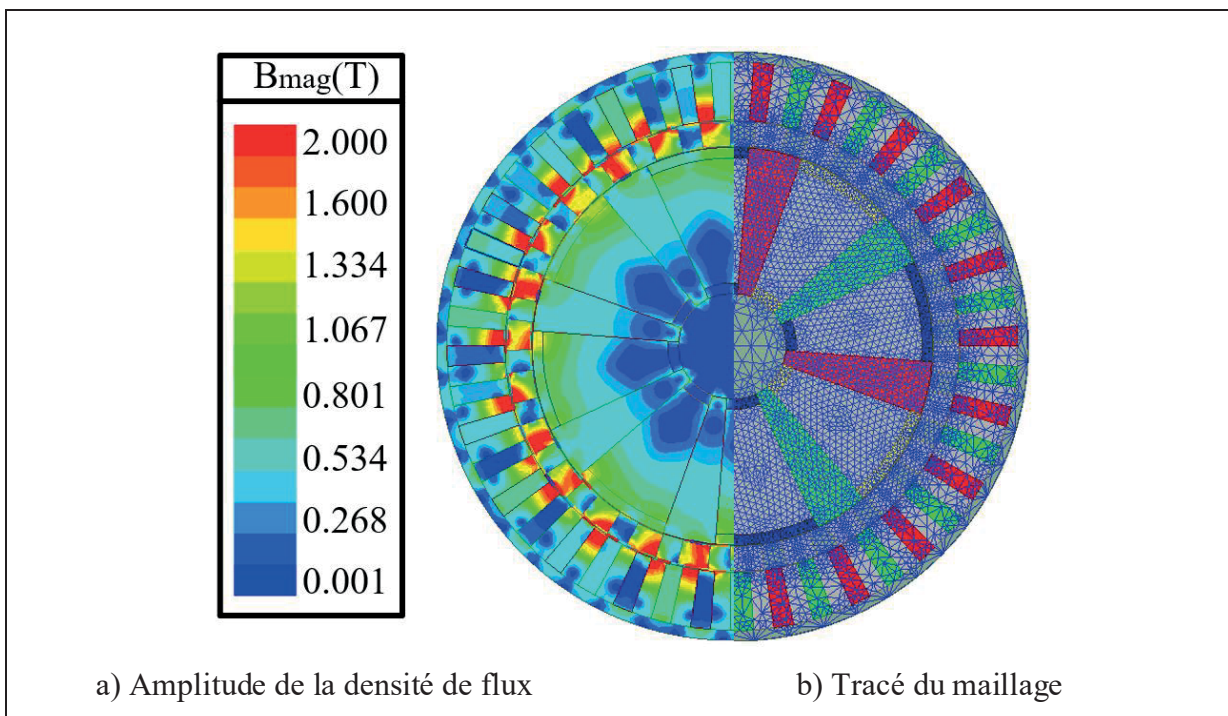


Figure 3.6 Superpositions de champs du FFH-CMG proposé

### 3.3.3 Formes d'ondes du couple

Le FFH-CMG est simulé dans deux modes de fonctionnement différents, le mode rotor bloqué ( $\Omega_3=0$ ) et le mode pleine charge. Les formes d'ondes du couple en fonction de la position rotor intérieur qui résultent de ces deux modes sont illustrées respectivement aux figures 3.7 et 3.8.

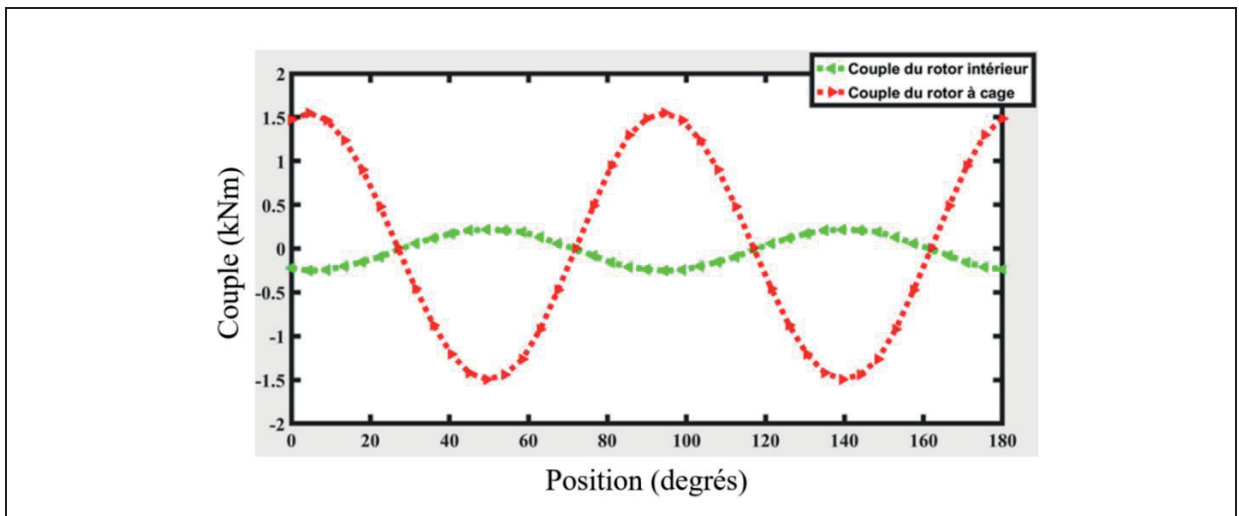


Figure 3.7 Formes d'ondes du couple à l'arrêt du FFH-CMG proposé

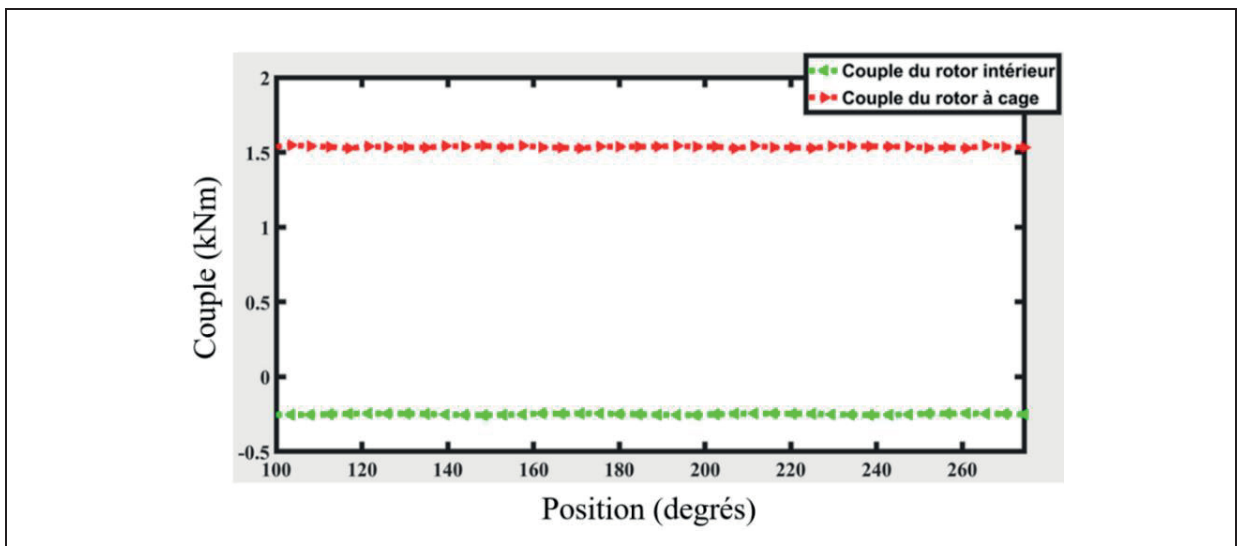


Figure 3.8 Formes d'ondes du couple en régime permanent du FFH-CMG proposé

Dans le premier mode de fonctionnement, le rotor extérieur et le rotor à cage sont bloqués, le rotor à grande vitesse tourne à une vitesse de 3000 tr/min. Un couple de sortie maximal de 1.5498 kNm est observé à la figure 3.7 lorsque le déplacement de la position du rotor à grande vitesse est de 4.5 degrés par rapport à sa position initiale. La densité de couple volumétrique (VTD) et le couple par unité de volume de PM (TPMV) sont ensuite calculés comme présenté aux sections 2.1.5 et 2.1.6. Les résultats obtenus sont respectivement de 318.43 kNm/m<sup>3</sup> et de 975.01 kNm/m<sup>3</sup>. Au cours de l'analyse en régime permanent, le rotor à grande vitesse et le rotor à cage tournent à des vitesses respectives de 3000 tr/min et 545.45 tr/min. La position initiale du rotor à cage est fixée à 4.5 degrés afin d'obtenir un couple de sortie maximal. La figure 3.8 illustre les formes d'ondes du couple de ce mode de fonctionnement.

Bien que l'analyse par éléments finis 2D permet de simuler plus rapidement le MG, elle ne tient pas compte de l'effet des flux de fuite sur les résultats finaux obtenus. Par conséquent, pour obtenir des résultats plus précis, une analyse par éléments finis en 3D est mise en œuvre, et les résultats sont présentés à la figure 3.9. Le couple maximal du rotor à cage est de 1.3303 kNm, ce qui est inférieur à la valeur obtenue dans l'analyse 2D. Le VTD et le TPMV du FFH-CMG proposé sont ensuite calculés. Les valeurs obtenues sont respectivement 273.33 kNm/m<sup>3</sup> et 840.66 kNm/m<sup>3</sup>, ce qui est inférieur aux valeurs obtenues en 2D.

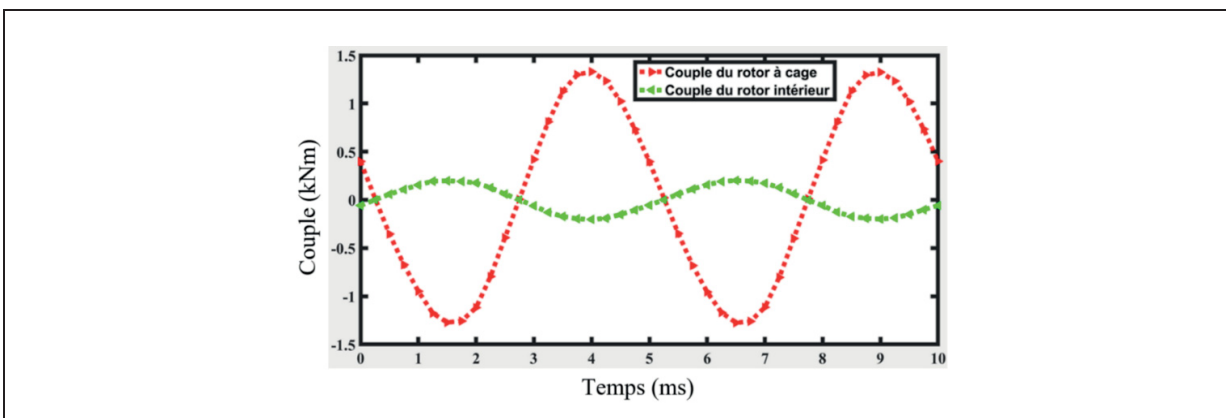


Figure 3.9 Formes d'ondes de couple du MG proposé en mode de fonctionnement à vide (FEA 3D)



### 3.3.4 Ondulation de couple

Pour déterminer l'ondulation de couple, un zoom des formes d'ondes de couple en régime permanent comme illustré à la figure 3.10 est effectué afin de mieux distinguer la fluctuation du couple. En se basant sur la section 2.1.7, l'ondulation de couple du rotor à grande vitesse et du rotor à cage est ensuite calculée. Les valeurs d'ondulation du couple de crête à crête du rotor à grande vitesse et à cage sont respectivement de 5.01 % et de 1.39 % de leur couple de sortie moyen.

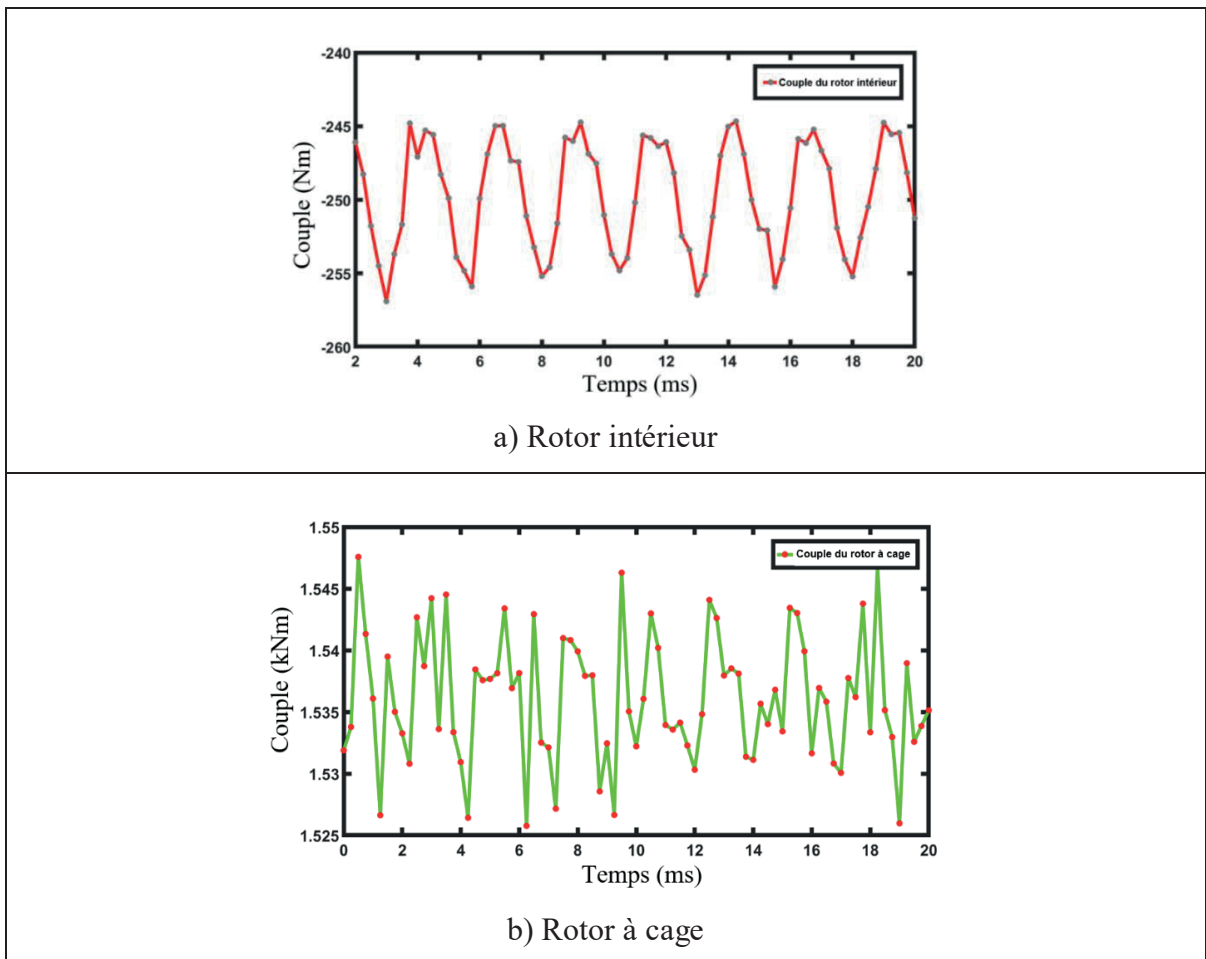


Figure 3.10 Zoom sur les formes d'ondes du couple en régime permanent

### 3.4 Comparaison entre le FFH-CMG proposé et ses homologues

Dans cette section, une comparaison est effectuée entre le FFH-CMG et les CMG existants. Les critères de comparaison sont la densité de couple, l'ondulation de couple et la complexité de fabrication.

Les résultats comparatifs du FFH-CMG proposé et d'autres MG sont présentés à la figure 3.11. Les topologies qui se distinguent sont : la topologie FF-CMG (Acharya et al., 2014), deux topologies HPM-CMG (Wong et al., 2023; Wong et al., 2019), la topologie TF-CMG (Yin et al., 2015) et la topologie proposée FFH-CMG. Ces topologies ont respectivement une densité de couple de  $252.6 \text{ kNm/m}^3$ ,  $261.4 \text{ kNm/m}^3$ ,  $279.3 \text{ kNm/m}^3$ ,  $282.56 \text{ kNm/m}^3$  et de  $273.33 \text{ kNm/m}^3$ . Le FFH-CMG proposé en comparaison avec les autres CMG existants possède donc la troisième plus haute densité de couple. L'ondulation de couple du FF-CMG, HPM-CMG, du TF-CMG et du FFH-CMG sont respectivement de 1.5 %, 1.6 %, 1.07 %, et de 1.39 %. Le FFH-CMG a donc en comparaison avec les autres CMG la deuxième plus faible ondulation de couple. En ce qui concerne la complexité de fabrication, le FFH-CMG proposé est la plus simple à construire en comparaison avec le FF-CMG, le HPM-CMG et le TF-CMG qui ont respectivement une complexité de fabrication moyenne, élevée et complexe.

La figure 3.12 présente une comparaison du FFH-CMG par rapport à d'autres CMG existants en fonction de l'ondulation de couple. Dans cette figure, Le HPM-CMG et le TF-CMG discutés précédemment ne sont pas pris en compte. Le FFH-CMG atteint la plus haute densité de couple par rapport aux autres CMG existants.

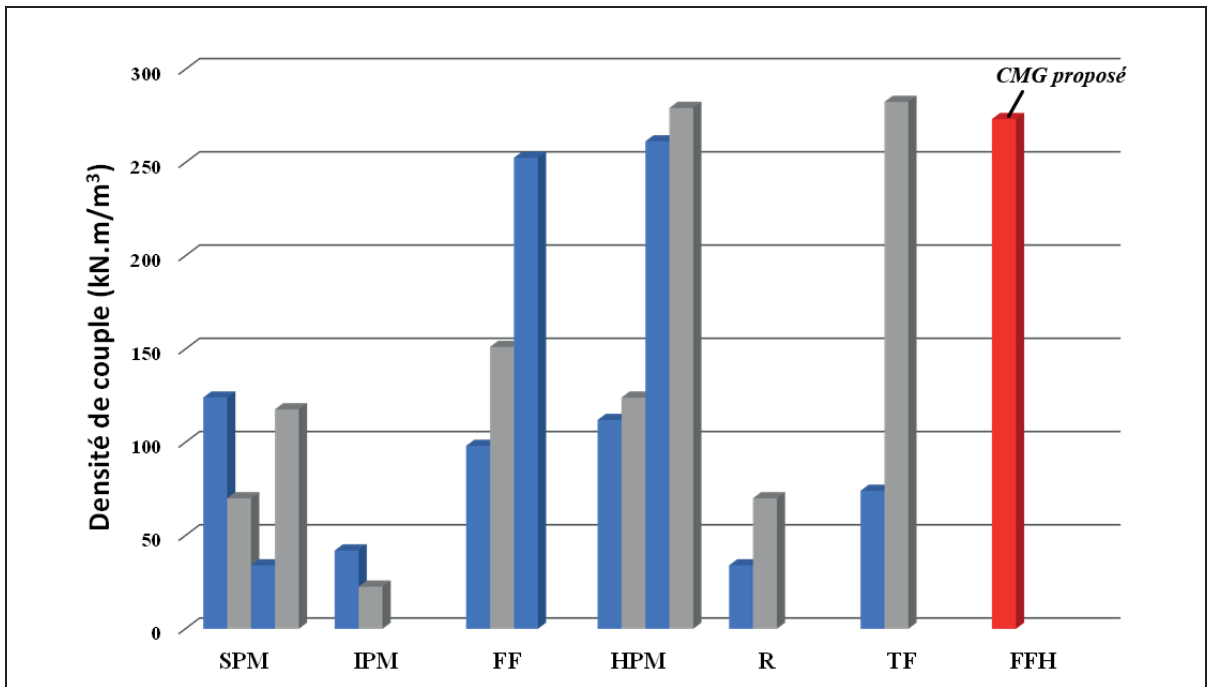


Figure 3.11 Comparaison du CMG proposé par rapport à ses homologues

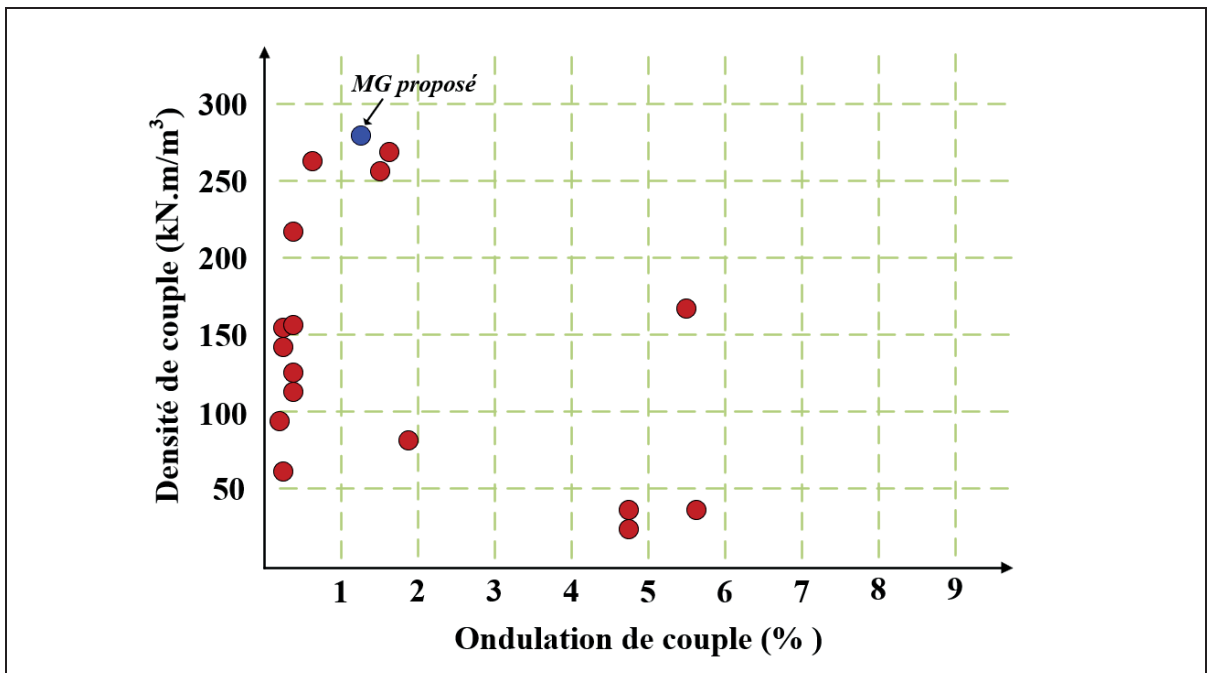


Figure 3.12 Statut général du FFH-CMG proposé par rapport à ses homologues

Les résultats de l'étude comparative sont résumés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Récapitulatif des résultats de l'étude comparative des CMG

<b>Indices de performance</b>	<b>FF-CMG</b>	<b>HPM-CMG</b>	<b>TF-CMG</b>	<b>FFH-CMG</b>
<b>VTD (kNm/m<sup>3</sup>)</b>	252.6	279.3	282.56	273.33
<b>Ondulation de couple (%)</b>	1.5	1.6	1.07	1.39
<b>Complexité de fabrication</b>	moyenne	élevée	complexe	moyenne

Cette étude comparative montre que la topologie TF-CMG permet d'atteindre la plus haute densité de couple, mais avec une structure complexe à fabriquer. Cependant, le FFH-CMG proposé résout ce problème en offrant en plus d'une densité de couple élevée et d'une faible ondulation de couple, une structure dont la complexité de fabrication est moyenne.

## CHAPITRE 4

### PRÉSENTATION ET VALIDATION DU MODÈLE OPTIMISÉ DE LA MACHINE A ENGRENAGE MAGNÉTIQUE

Ce chapitre présente et valide le modèle optimisé de la machine à engrenage magnétique axial (AMGM) proposée. Les performances électromagnétiques sont étudiées à l'aide du FEA 3D. Une comparaison entre la AMGM proposée et ses homologues est ensuite établie afin de mesurer l'apport de la structure proposée.

#### 4.1 Proposition d'une machine à engrenage magnétique

Cette section présente la machine à engrenage magnétique axial (AMGM) conçue à l'aide d'Ansys Maxwell 3D. Le couplage axial est choisi, car elle est plus adaptée aux objectifs de recherche fixés. La AMGM est conçue en couplant le modèle optimisé du FFH-CMG présenté à la section 3.2 et la machine à PM à grande vitesse présentée à la section 4.1.2. La figure 4.1 illustre la MGM proposée. Sur cette figure, le moteur électrique est couplé au MG et le tout est placé à l'intérieur d'une enveloppe protectrice nommée carter. Une vue détaillée des composants de la MGM est illustrée à la figure 4.2.

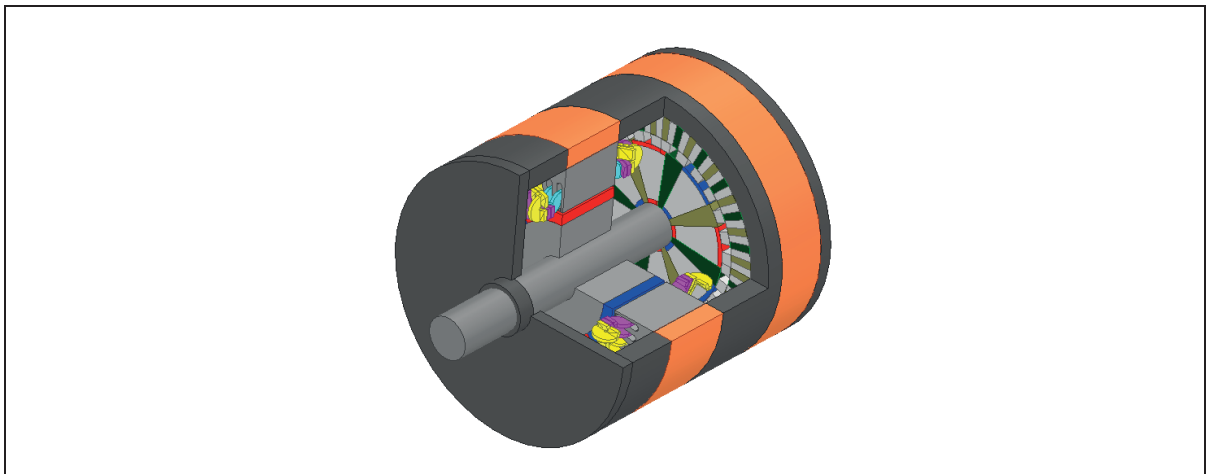


Figure 4.1 Vue en coupe de la machine à engrenage magnétique proposée

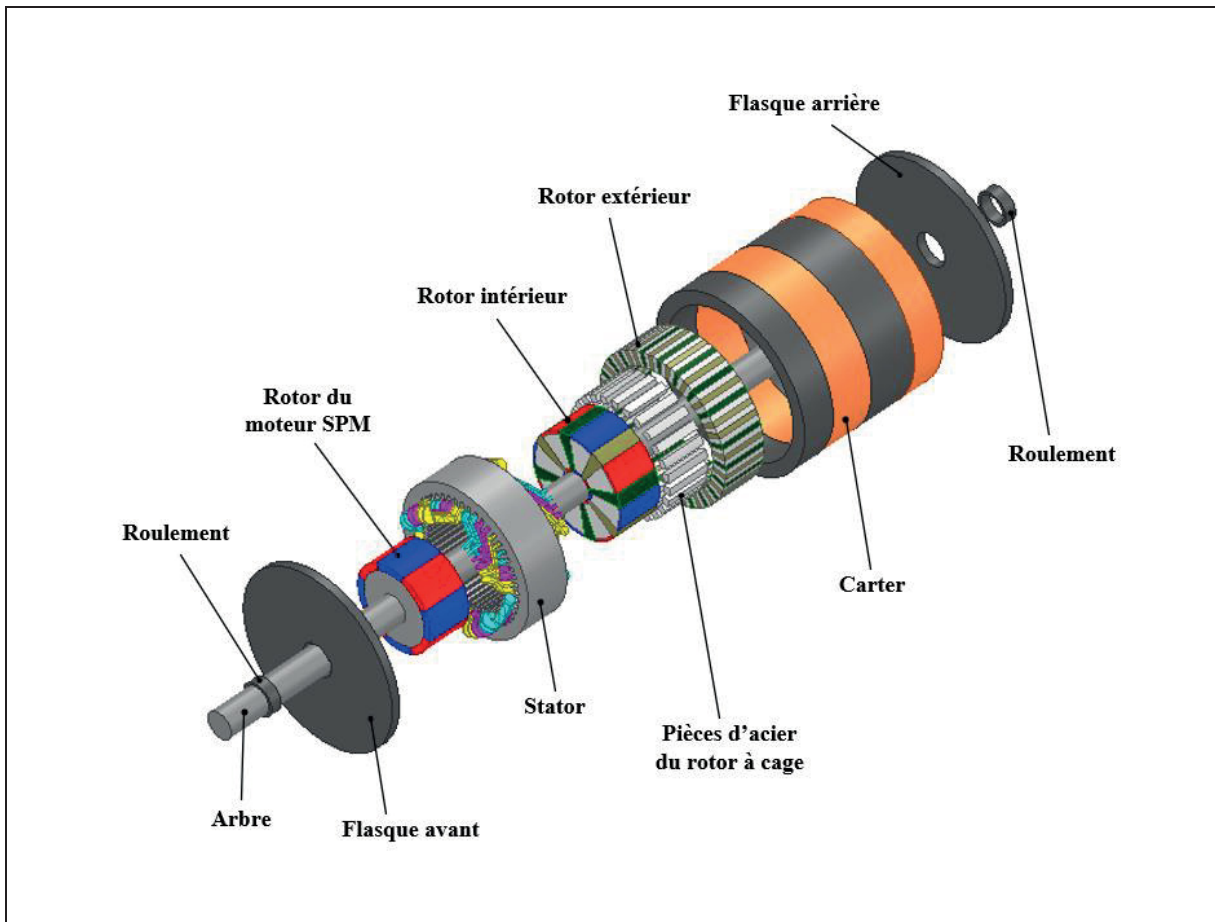


Figure 4.2 Vue en éclaté de la machine à engrenage magnétique proposée

#### 4.1.1 Principe de fonctionnement

La AMGM est un dispositif compact créé en combinant axialement un moteur électrique et un engrenage magnétique (MG). Le moteur électrique et l'engrenage magnétique sont situés respectivement à l'entrée et à la sortie du dispositif. Lorsque le moteur électrique est alimenté, le stator crée un champ magnétique rotatif qui interagit avec le champ magnétique du rotor à aimants permanents (SPM). Cette interaction provoque la rotation du rotor SPM, qui est couplé au rotor intérieur de l'engrenage magnétique, transmettant ainsi la puissance du moteur. En conséquence, le rotor intérieur se met à tourner. Les champs magnétiques créés par le rotor intérieur et le rotor extérieur sont ensuite modulés par les pièces polaires ferromagnétiques afin de transmettre le couple du rotor intérieur au rotor extérieur.

#### 4.1.2 Moteur électrique à aimants permanents

Il existe deux principales topologies de rotor au niveau des machines à aimants permanents : le rotor à aimants permanents montés en surface (SPM) et le rotor à aimants permanents intérieurs (IPM) (Dong et al., 2016). Le rotor SPM est choisi dans ce présent mémoire en raison de sa simplicité de fabrication.

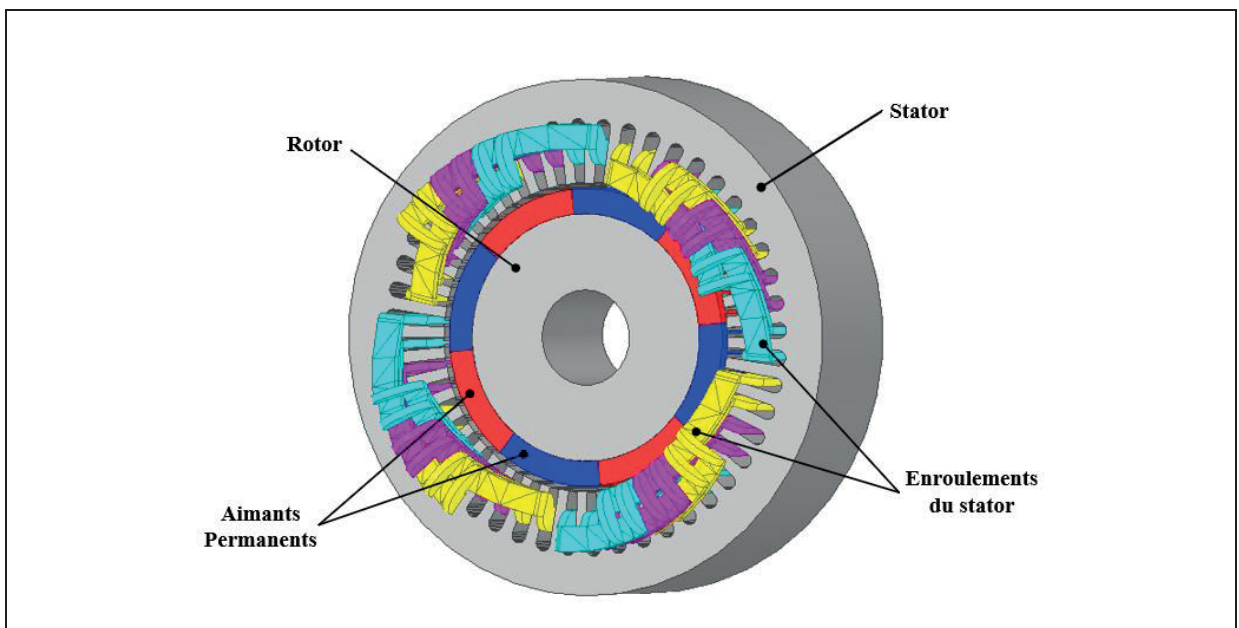


Figure 4.3 Configuration du moteur électrique à aimants permanents montés en surface proposée

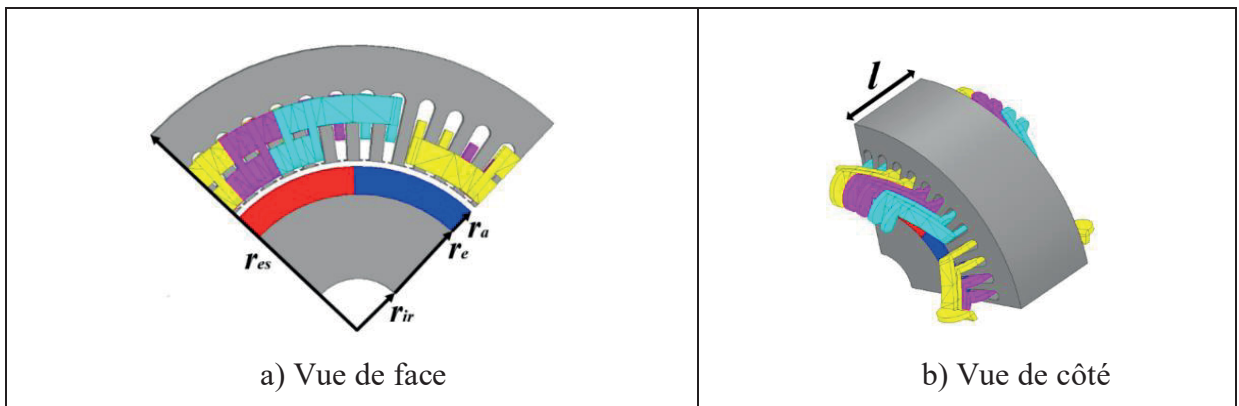


Figure 4.4 Paramètres géométriques du moteur SPM

La figure 4.3 illustre la configuration du moteur SPM proposé. Les paramètres géométriques du moteur sont choisis afin d'être adaptés aux dimensions de la FFH-CMG. Les principaux paramètres géométriques du moteur SPM sont résumés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Paramètres géométriques du moteur SPM et propriétés des matériaux

	<b>Paramètre</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
<b>Rotor</b>	Paires de pôles, $p_m$	4	-
	Rayon intérieur, $r_{ir}$	25	mm
	Rayon extérieur, $r_{er}$	78	mm
	Rayon de l'aimant, $r_a$	13	mm
	Longueur de l'entrefer, $l_m$	2	mm
<b>Stator</b>	Nombre d'encoches du stator, $n_e$	48	-
	Rayon intérieur, $r_{is}$	80	mm
	Rayon extérieur, $r_{es}$	134	mm
<b>Matériau</b>	Rémanence de l'aimant NdFeB, $B_r$	1.21	T
	Perméabilité de l'aimant NdFeB, $\mu$	1.05	H/m
	Densité de masse de l'acier M19 29G	7872	Kg/m <sup>3</sup>
Longueur de la pile, $l$		80	mm

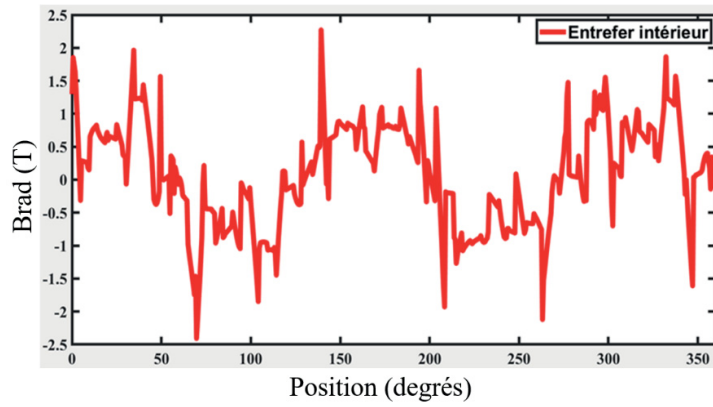
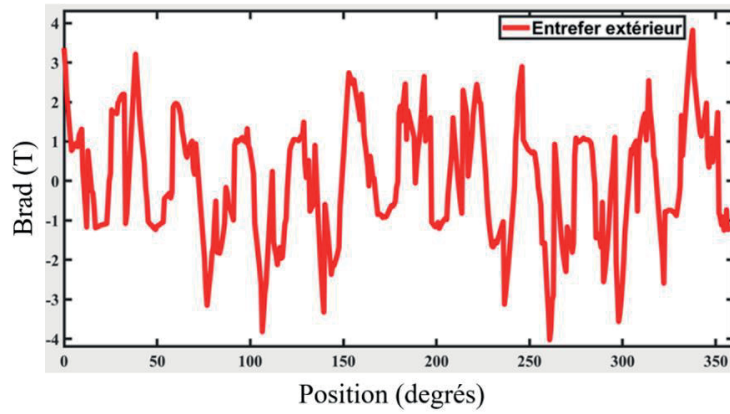
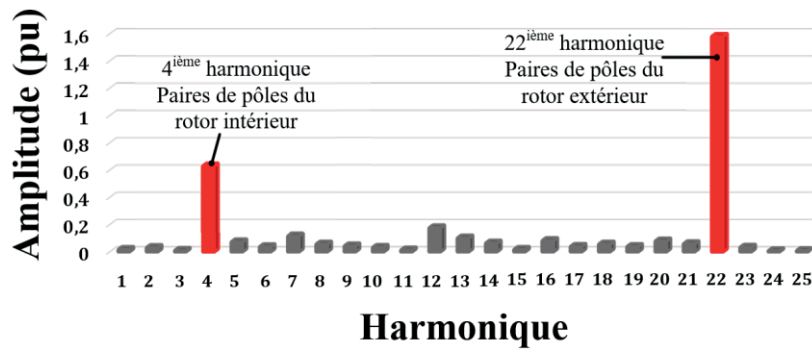


## 4.2 Analyse des résultats de simulation

Cette section est consacrée à la validation de la AMGM proposée. Un examen des performances électromagnétiques du FFH-CMG et du moteur SPM est effectué à l'aide du FEA 3D.

### 4.2.1 Densité de flux dans l'entrefer et analyse harmonique

L'étude de la densité de flux dans l'entrefer intérieur et extérieur adjacent respectivement au rotor à grande et à petite vitesse est effectuée afin d'analyser la répartition du flux magnétique dans ces deux zones de la AMGM lors de son fonctionnement à vide ( $\Omega_3=0$ ). Les formes d'ondes de la densité de flux radial de ces deux zones en fonction de la position du rotor à grande vitesse sont présentées respectivement aux figures 4.5.(a) et 4.5.(b). L'amplitude de la densité de flux au niveau du rotor à grande vitesse et à petite vitesse atteint respectivement un pic de 2.5 T et 4 T. La quantité de flux magnétique qui traverse l'entrefer extérieur est donc plus importante que celle qui traverse l'entrefer intérieur. Le spectre harmonique correspondant à la densité de flux radial dans l'entrefer extérieur est également présenté à la figure 4.5.(c). Il est possible de constater que les harmoniques les plus dominantes sont la 4<sup>e</sup> et la 22<sup>e</sup> harmonique avec des valeurs d'amplitudes respectives de 0.628 pu et 1.58 pu. Ces harmoniques correspondent au nombre de paires de pôles du rotor intérieur et du rotor extérieur. Elles contribuent, par leurs interactions, à la transmission du couple du rotor à grande vitesse au rotor à petite vitesse.

a)  $B_r$  dans l'entrefer adjacent au rotor intérieurb)  $B_r$  dans l'entrefer adjacent au rotor extérieurc) Spectre harmonique de  $B_r$  dans l'entrefer adjacent au rotor extérieurFigure 4.5 Densité de flux radial ( $B_r$ ) du FFH-CMG couplé au SPM

## 4.2.2 Distribution de flux et maillage de la AMGM

Dans cette partie, l'analyse de la distribution de flux et le maillage se fait à deux niveaux, au niveau du FFH-CMG et au niveau du moteur SPM.

### 4.2.2.1 Distribution de flux et maillage du FFH-CMG

L'étude sur le maillage du FFH-CMG est effectuée afin de garantir la précision des résultats obtenus par simulation. Le tracé de maillage est illustré à la figure 4.6.(b). Le maillage est fin et prend en compte toute la géométrie du FFH-CMG. Il est donc de bonne qualité. La distribution de flux magnétique à travers le FFH-CMG est présentée à la figure 4.6.(a). L'analyse de celle-ci montre que les bords des segments du rotor à cage et du pôle en acier du rotor intérieur sont légèrement saturés. Cette saturation peut être toutefois supprimée en augmentant la portée du rotor à cage ( $\theta_{rc}$ ) et la portée du pôle en acier ( $\theta_{ari}$ ). Cela a pour conséquence une réduction de l'effet modulant du rotor à cage entraînant ainsi une réduction du couple de sorties de la AMGM proposé.

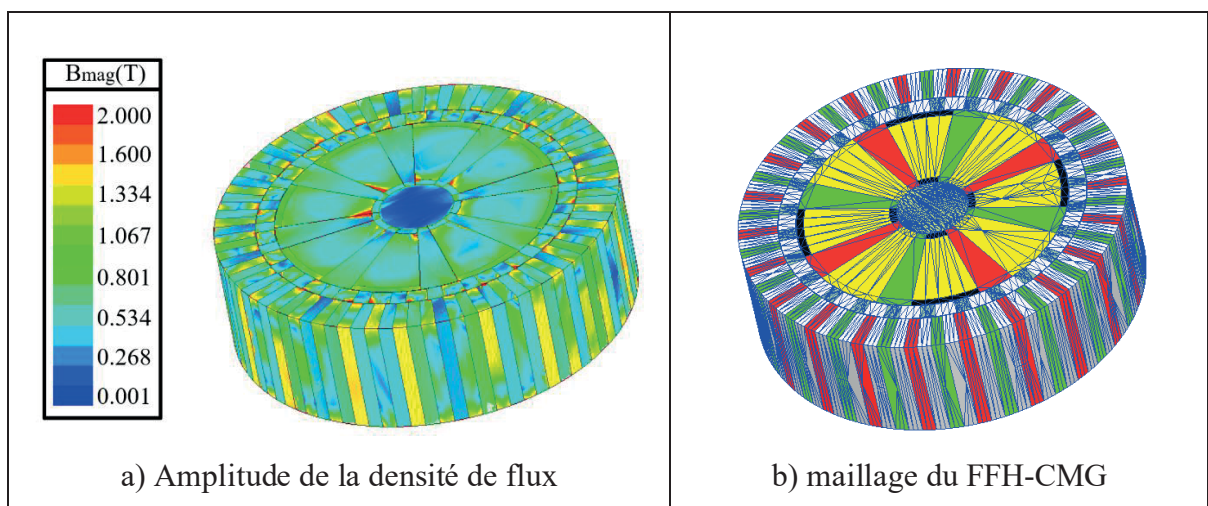


Figure 4.6 Distributions de la densité de flux et maillage du FFH-CMG

#### 4.2.2.2 Distribution de flux et maillage du moteur SPM

Le tracé de maillage du SPM est illustré à la figure 4.7.(b). Le maillage est fin et prend en compte toute la géométrie du moteur SPM. Il est donc de bonne qualité. La distribution de flux magnétique est présentée à la figure 4.7.(a). Aucune saturation n'est observée au niveau du moteur SPM.

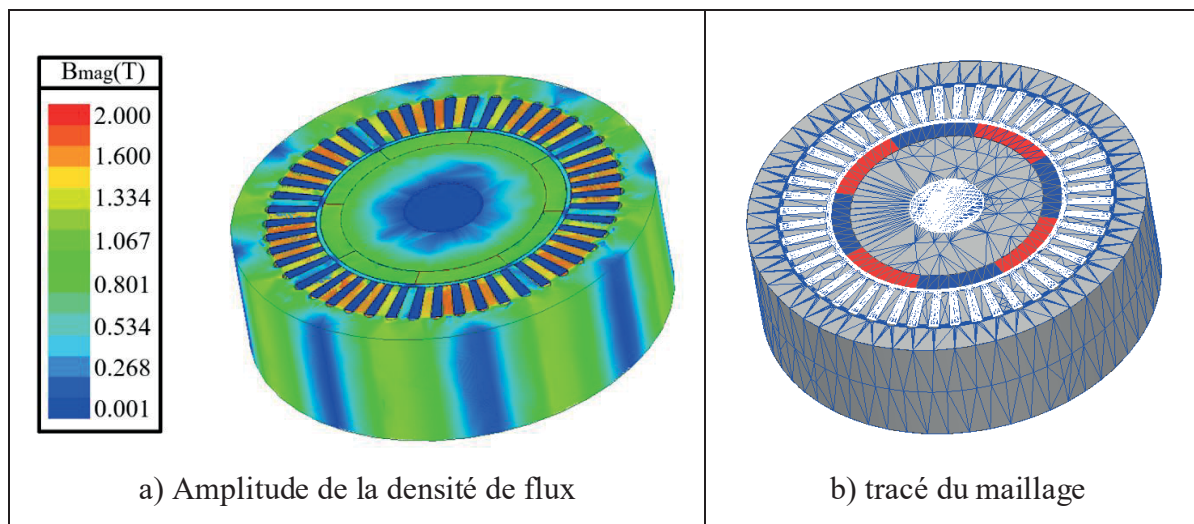


Figure 4.7 Distribution de la densité de flux et maillage du moteur SPM

#### 4.2.3 Formes d'ondes du couple

Le moteur SPM est simulé et étudié afin de mesurer son impact au niveau de la AMGM. La figure 4.8 illustre le couple du moteur SPM en fonction de la position du rotor. Le moteur SPM permet à lui tout seul d'atteindre une densité de couple de 46.81 Nm. La AMGM proposée est ensuite simulée dans deux modes de fonctionnement différents, le mode rotor bloqué et le mode pleine charge. Les formes d'ondes du couple en fonction de la position du rotor intérieur qui résultent de ces deux modes sont illustrées respectivement aux figures 4.9 et 4.10.

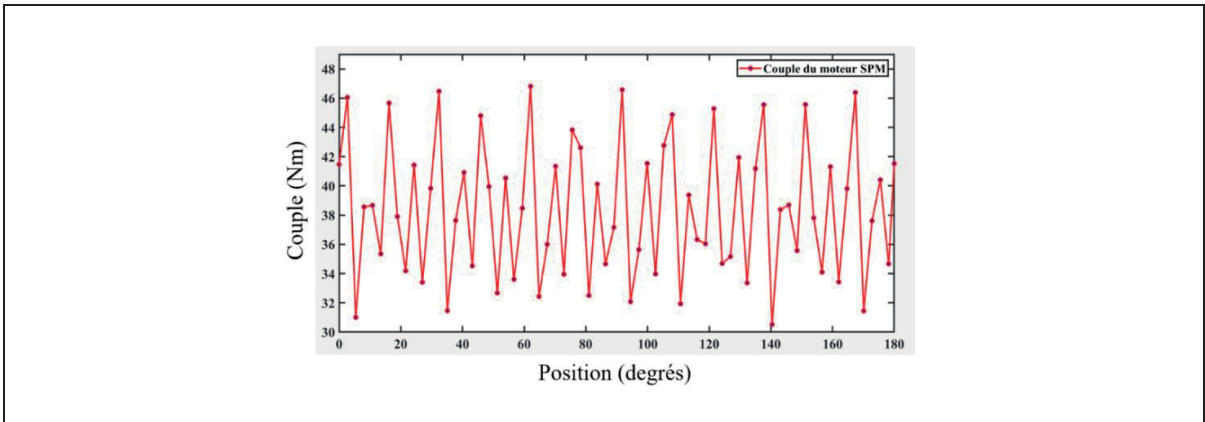


Figure 4.8 Forme d'onde de couple du moteur SPM

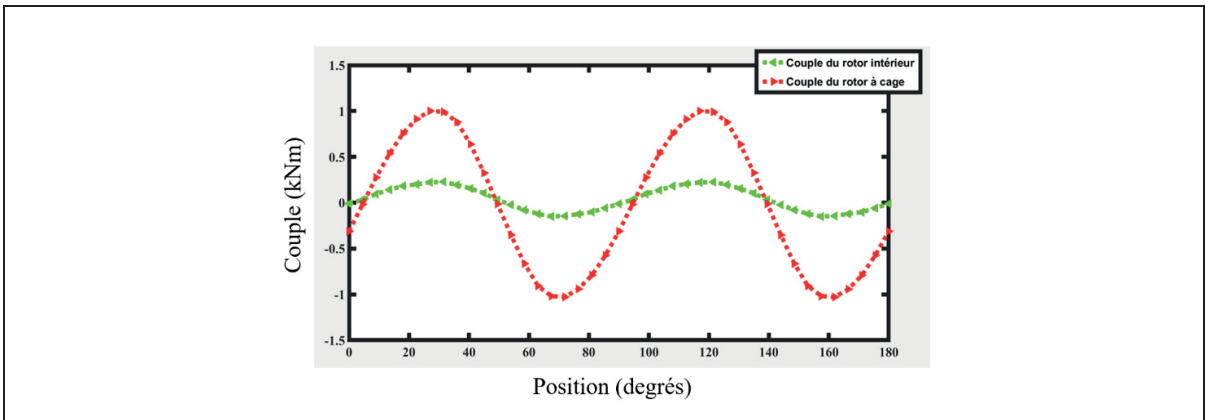


Figure 4.9 Formes d'ondes de couple de la AMG proposée en mode de fonctionnement à vide

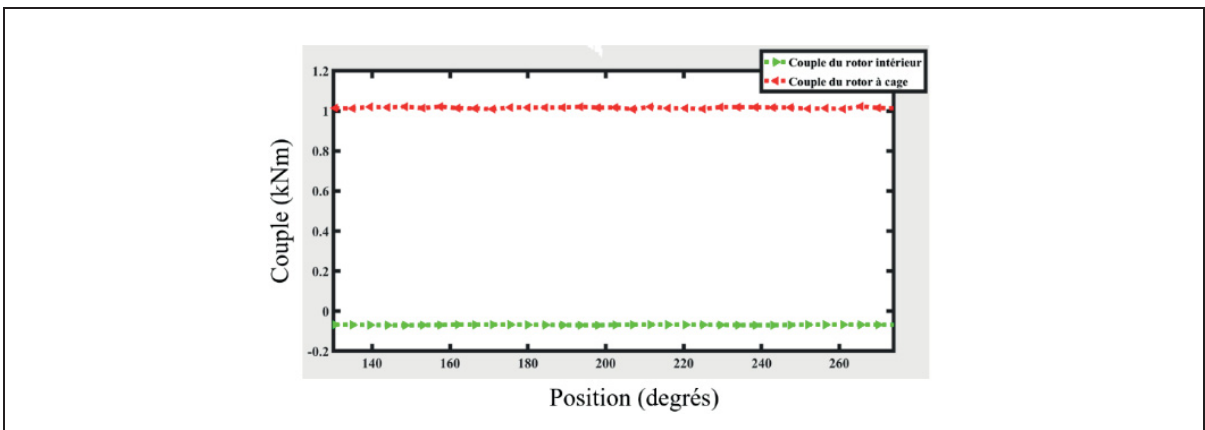


Figure 4.10 Formes d'ondes du couple en régime permanent du AMG proposé

Dans le premier mode de fonctionnement, le rotor extérieur et le rotor à cage du FFH-CMG sont bloqués, le rotor intérieur tourne à une vitesse de 3000 tr/min. La figure 4.9 montre que le couple de sorties maximal que la AMGM peut atteindre est 1.0101 kNm. La densité de couple volumétrique (VTD) et Le couple par unité de volume PM (TPMV) sont ensuite calculés comme présenté aux sections 2.1.5 et 2.1.6. Les valeurs obtenues sont respectivement de 110.26 kNm/m<sup>3</sup> et de 492.81 kNm/m<sup>3</sup>. Au cours de l'analyse en régime permanent, le rotor intérieur et le rotor à cage tournent à des vitesses respectives de 3000 et 545.45 tr/min. La position initiale du rotor à cage est fixée à 118.8 degrés par rapport à sa position initiale afin d'obtenir un couple de sorties maximal.

#### **4.2.4 Ondulation de couple**

Pour calculer l'ondulation de couple au niveau de la AMGM proposée, la même méthode utilisée à la section 3.24 est adoptée. Un zoom effectué dans les formes d'ondes de couple en régime permanent illustrées à la figure 4.10 est effectué afin de mieux distinguer la fluctuation du couple. En se basant sur la section 2.1.7, l'ondulation de couple du rotor à grande vitesse et du rotor à cage est ensuite calculée. Les valeurs d'ondulation du couple de crête à crête du rotor à grande vitesse et du rotor à cage obtenue sont respectivement de 4.84 % et 1.33 % de leur couple de sortie moyen.

### **4.3 Comparaison entre la machine à engrenage magnétique axial proposée et ses homologues**

Dans cette section, une comparaison est effectuée entre la AMGM proposée et les autres CMG existants. Les critères de comparaison sont la densité de couple et la complexité de fabrication.

Les résultats comparatifs de la AMGM proposée et d'autres MGM sont présentés à la figure 4.11. Les topologies à trois entrefers se distinguent le plus par leur forte densité de couple. La topologie RFMGM1 (Gerber & Wang, 2015a), la topologie RFMGM2 (Rasmussen et al., 2009), la topologie AFMGM (Wang et al., 2013) et la topologie proposée ont respectivement

une densité de couple de  $114.6 \text{ kNm/m}^3$ ,  $130 \text{ kNm/m}^3$ ,  $105 \text{ kNm/m}^3$  et  $110.26 \text{ kNm/m}^3$ . La AMGM proposée en comparaison avec les autres MGM existants possède donc la troisième plus haute densité de couple. En ce qui concerne la complexité de fabrication, la AMGM proposée est la plus simple à construire en comparaison avec les topologies RFMGM1, RFMGM2 et La AFMGM qui ont respectivement une complexité de fabrication complexe et élevée.

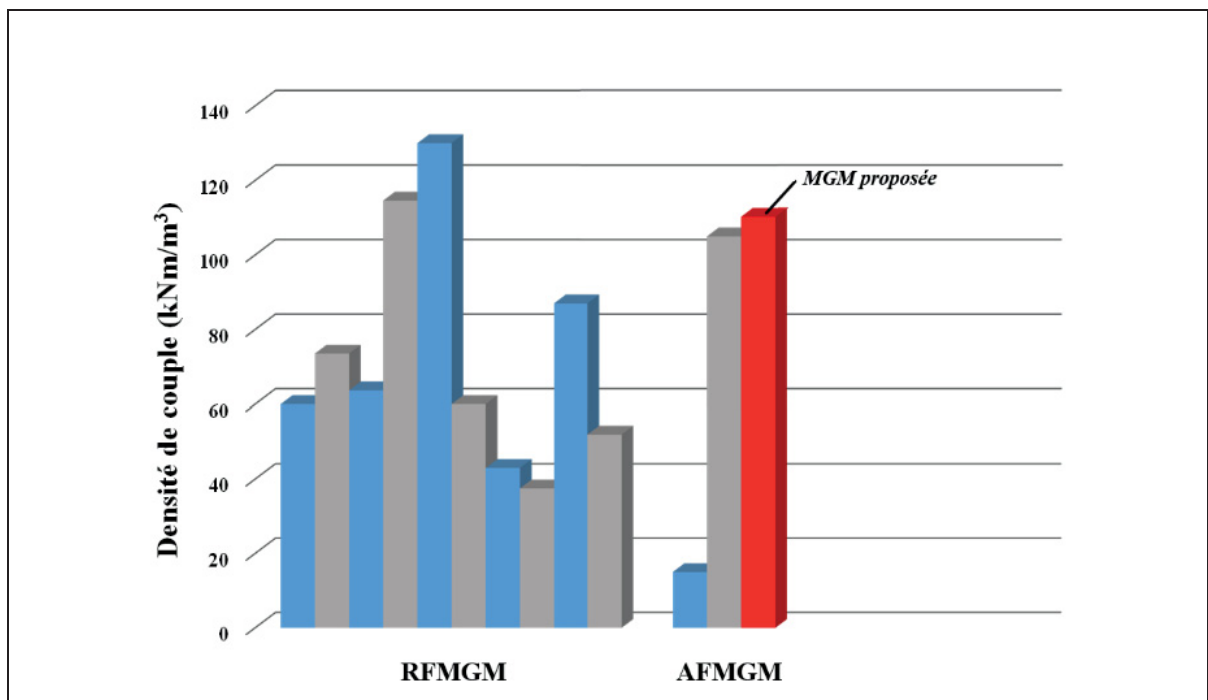


Figure 4.11 Comparaison de la AMGM proposée par rapport à ses homologues

Les résultats de l'étude comparative sont résumés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Récapitulatif des résultats de l'étude comparative du MGM

Indices de performance	RFMGM1	RFMGM2	AFMGM	AMGM
<b>VTD</b> ( $\text{kNm/m}^3$ )	114.6	130	105	110.26
<b>Complexité de fabrication</b>	complexe	complexe	élevée	moyenne

Cette étude comparative montre que la topologie RFMGM2 permet d'atteindre la plus haute densité de couple, mais avec une structure complexe à fabriquer. Cependant, la AMGM résout ce problème en offrant non seulement une densité de couple élevée, mais aussi une structure dont la complexité de fabrication est moyenne.



## CHAPITRE 5

### DISCUSSION

Ce mémoire vise à concevoir une MGM qui répond à trois principaux objectifs. Le premier objectif est d'atteindre une densité de couple élevée. Le deuxième objectif est de réduire le plus possible l'ondulation de couple et le troisième est d'utiliser le volume minimum d'aimants permanents requis afin de réduire le coût total de la MGM.

Pour atteindre ces objectifs, une recherche approfondie et une analyse des sources existantes sont entreprises afin de comprendre le fonctionnement des MGM, de connaître les méthodes de conception et les différentes techniques d'optimisation utilisées dans le domaine. Cette analyse permet de déterminer les paramètres de conception clé sur lesquels agir pour obtenir une densité de couple élevée et une ondulation de couple réduite. Ensuite, le logiciel Ansys Maxwell est utilisé pour procéder à la conception de la MGM. La méthode par balayage de paramètres est utilisée pour optimiser les paramètres clés.

#### 5.1 Analyse et interprétation des résultats

L'engrenage magnétique (MG) est l'élément central de la AMGM proposée. Pour cette raison la conception et l'optimisation du MG sont traitées en premier. L'optimisation par balayage de paramètres du CMG proposé (FFH-CMG) réalisé à l'aide du FEA 2D permet d'obtenir un couple de décrochage maximal et un couple par unité de volume (TPMV) respectivement de 1.753 5 kNm et de 975.01 kNm/m<sup>3</sup>. Elle permet également de déterminer un modèle optimisé du FFH-CMG qui est ensuite analysé par FEA 3D. De cette analyse, un couple de sortie maximal (T<sub>max</sub>), une densité de couple (VTD) et un TPMV respectivement de 1.330 3 kNm, de 273.33 kNm/m<sup>3</sup> et de 840.66 kNm/m<sup>3</sup> sont déterminés. L'ondulation de couple au niveau du rotor à grande vitesse et du rotor à cage est calculée et les valeurs obtenues sont respectivement de 5.01 % et de 1.39 %. Le FFH-CMG est ensuite couplé axialement à un moteur SPM afin de former une AMGM. La AMGM est analysée par FEA

3D. Un  $T_{max}$ , une VTD, une ondulation de couple au niveau du rotor intérieur et du rotor à cage respectivement de 1.0101 kNm, 110.26 kNm/m<sup>3</sup>, 4.84 % et de 1.33 % sont obtenus. Tous les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 5.1.

Lors de l'optimisation du FFH-CMG, le couple maximal augmente avec le volume de PM. Cela est dû à l'augmentation du flux magnétique total généré par celui-ci. L'analyse du modèle optimisé du FFH-CMG par FEA 3D donne des valeurs inférieures à celle obtenue par FEA 2D. Cela est dû aux flux de fuites qui ne sont pas pris en compte lors du FEA 2D. En outre, l'ondulation de couple demeure faible tout au long du processus en raison de la configuration halbach du FFH-CMG qui permet de le réduire considérablement. Au niveau de la AMGM proposée, une diminution du couple de sortie maximal due aux pertes de transmission du moteur SPM est observée.

Tableau 5.1 Récapitulatif des résultats obtenus

Indices de performance	FEA 2 D		FEA 3D	
	Optimisation	FFH-CMG	FFH-CMG	AMGM
<b>T<sub>max</sub></b> (kNm)	1.7535	1.5498	1.3303	1.0101
<b>VTD</b> (kNm/m <sup>3</sup> )	> 360	318.43	273.33	110.26
<b>TPMV</b> (kNm/m <sup>3</sup> )	975.01	975.01	840.66	492.81

## 5.2 Comparaison avec les travaux antérieurs

Les figures 3.11 et 4.11 illustrent respectivement une comparaison effectuée entre le FFH-CMG, la AMGM et leurs homologues respectifs.

Le FFH-CMG permet d'atteindre en comparaison avec les autres CMG existants la troisième plus haute densité de couple. Il a également le meilleur TPMV, ce qui est un grand avantage en ce qui concerne le coût. Il constitue également le meilleur choix en comparaison avec les deux autres CMG qui ont les VTD les plus élevées en ce qui concerne la simplicité de construction.

La AMGM proposée permet d'atteindre la troisième plus haute densité de couple en comparaison avec les autres MGM existants. Mais elle constitue le meilleur choix en comparaison avec les deux MGM qui ont les VTD les plus élevées (Gerber & Wang, 2013a; Rasmussen et al., 2009) en ce qui concerne la simplicité de construction et d'adaptabilité aux systèmes tels que les véhicules électriques.

### **5.3 Implications et applications pratiques**

Les résultats obtenus contribuent à résoudre les problèmes de poids et de coût rencontrés par les systèmes à entraînement direct. Car la AMGM conçue a à la fois une complexité de fabrication moyenne et permet d'atteindre une densité de couple élevée tout en conservant la petite taille et le poids réduit du moteur. Les valeurs minimales de densité de couple adaptées aux véhicules électriques sont respectivement de  $200 \text{ kNm/m}^3$  pour un MG et de  $100 \text{ kNm/m}^3$  pour une MGM. Les valeurs obtenues sont largement au-dessus. La AMGM est donc parfaitement adaptée au domaine des véhicules électriques.

### **5.4 Limites de l'étude**

Malgré ces bons résultats obtenus par simulation, les contraintes de temps et les ressources limitées nous empêchent de réaliser une étude expérimentale. En effet, la présence de données expérimentales aurait permis de mesurer la précision et la fiabilité des modèles de simulation proposés.

De plus, notre étude s'est concentrée sur trois paramètres de performance : la densité de couple, l'ondulation de couple et le couple par unité de volume de PM. Cela limite l'étude dans son ensemble du fait qu'elle ne traite pas tous les aspects de la conception.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans ce mémoire, il est question de résoudre efficacement les contraintes de poids et de coût rencontrés par les systèmes de transmission directe ainsi que les problèmes rencontrés au niveau des systèmes de transmission par engrenages mécaniques. Une nouvelle configuration de machine à engrenage magnétique axial (AMGM) est proposée. Elle est dans un premier temps optimisée par la méthode par balayage de paramètres et le modèle optimisé est ensuite validé par l'analyse par éléments finis 3D. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, car la AMGM proposée permet d'atteindre une densité de couple élevée, un couple par unité de volume de PM élevé et une faible ondulation de couple respectivement de 110.26 kNm/m<sup>3</sup>, de 492.81 kNm/m<sup>3</sup> et de 1.33 %. Le TPMV élevé a pour conséquence une réduction considérable du coût total de la machine.

La AMGM proposée fait partie des meilleurs choix possibles dans le domaine des véhicules électriques en comparaison aux autres MGM existants, car elle a une structure compacte, une complexité de fabrication moyenne et une densité de couple largement supérieur au seuil adapté. Cependant, le manque de données expérimentales de la AMGM proposée pourrait introduire un certain degré d'incertitude au niveau des résultats obtenus par simulation.

L'exploration de la méthode d'optimisation multiobjectif, la réalisation d'une étude thermique approfondie et la conception d'un convertisseur adapté à la AMGM pourraient constituer des prolongements de la recherche prometteurs. Ces démarches pourraient déboucher sur la conception d'une chaîne de traction innovante pour les véhicules électriques. En effet, la méthode d'optimisation multiobjectif permettrait de déterminer les paramètres géométriques optimaux du AMGM en tenant compte de l'ensemble des aspects de conception. L'étude thermique permettrait d'améliorer les performances électromagnétiques et la durée de vie du AMGM.



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acharya, V. M., Bird, J. Z., & Calvin, M. (2013). A Flux Focusing Axial Magnetic Gear. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(7), 4092-4095. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2248703> >.
- Acharya, V. M., Calvin, M., & Bird, J. Z. (2014). A low torque ripple flux focusing axial magnetic gear. 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014).
- Aiso, K., & Akatsu, K. (2016, 18-22 Sept. 2016). A novel reluctance magnetic gear for high speed motor. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- Aiso, K., Akatsu, K., & Aoyama, Y. (2017, 1-5 Oct. 2017). Reluctance magnetic gear and flux switching magnetic gear for high speed motor system. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- Aiso, K., Akatsu, K., & Aoyama, Y. (2020, 11-15 Oct. 2020). Motor System Integrated Magnetic Multiple Spur Gear and High Speed Motors for Electric Vehicle. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- Aloeyi, E. F., Ali, N., & Wang, Q. (2022, 28-31 Oct. 2022). A Review of In-Wheel Motors for Electric Vehicle Propulsion. 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific).
- Aloeyi, E. F., Shoaie, A., & Wang, Q. (2023). A hybrid coaxial magnetic gear using flux-focusing halbach permanent magnet arrangement. Accepted in 14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems IEEE (PEDS 2023).
- Armstrong. (1901). Power transmitting device. USA Patent 687,292.
- Atallah, K., Calverley, S., & Howe, D. (2004). Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 151(2), 135-143.
- Atallah, K., & Howe, D. (2001). A novel high-performance magnetic gear. *IEEE Transactions on Magnetics*, 37(4), 2844-2846. < <https://doi.org/10.1109/20.951324> >.
- Atallah, K., Rens, J., Mezani, S., & Howe, D. (2008). A Novel “Pseudo” Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(11), 4349-4352. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2001509> >.

- Bang, T. K., Shin, K. H., Koo, M. M., Han, C., Cho, H. W., & Choi, J. Y. (2018). Measurement and Torque Calculation of Magnetic Spur Gear Based on Quasi 3-D Analytical Method. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3), 1-5. < <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2779750> >.
- Bomela, W., Bird, J. Z., & Acharya, V. M. (2014). The Performance of a Transverse Flux Magnetic Gear. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(1), 1-4. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2277431> >.
- Chau, K. T., Zhang, D., Jiang, J. Z., Liu, C., & Zhang, Y. (2007). Design of a Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6), 2504-2506. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.893714> >.
- Chen, J. T., & Zhu, Z. Q. (2010). Winding Configurations and Optimal Stator and Rotor Pole Combination of Flux-Switching PM Brushless AC Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(2), 293-302. < <https://doi.org/10.1109/TEC.2009.2032633> >.
- Chen, J. T., Zhu, Z. Q., Thomas, A. S., & Howe, D. (2008, 17-20 Oct. 2008). Optimal combination of stator and rotor pole numbers in flux-switching PM brushless AC machines. 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems.
- Chen, Y., Fu, W. N., Ho, S. L., & Liu, H. (2014). A Quantitative Comparison Analysis of Radial-Flux, Transverse-Flux, and Axial-Flux Magnetic Gears. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11), 1-4. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2327622> >.
- Chmelicek, P., Calverley, S. D., Dragan, R. S., & Atallah, K. (2019). Dual Rotor Magnetically Geared Power Split Device for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(2), 1484-1494. < <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2883547> >.
- Dai, B., Nakamura, K., Suzuki, Y., Oishi, Y., Tachiya, Y., & Kuritani, K. (2020, 24-27 Nov. 2020). Comparison of Two Different Interior Permanent Magnet Type Low-speed Rotor Structures of Axial-Flux Magnetic Gear. 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- Desvaux, M., Chauwin, M., Multon, B., Sire, S., & Ben Ahmed, H. (2021). Experimental validation of a transverse flux magnetic gear. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 536, 168139. < <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168139> >.
- Desvaux, M., Multon, B., Sire, S., & Ahmed, H. B. (2017, 21-24 May 2017). Analytical iron loss model for the optimization of magnetic gear. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC).



- Dong, J., Huang, Y., Jin, L., & Lin, H. (2016). Comparative Study of Surface-Mounted and Interior Permanent-Magnet Motors for High-Speed Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(4), 1-4. < <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2514342> >.
- Faus. (27 May 1941). Magnet gearing. U.S. Patent 2 243 555.
- Filippini, M. (2018). *Magnetic gears numerical modelling and optimization* Dissertation, Universita degli Studi di Padova.
- Frank, N. W., & Toliyat, H. A. (2009, 3-6 May 2009). Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines. 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference.
- Frank, N. W., & Toliyat, H. A. (2010, 12-16 Sept. 2010). Analysis of the concentric planetary magnetic gear with strengthened stator and interior permanent magnet (IPM) inner rotor. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- Gao, Y., Qu, R., Li, J., Li, D., & Wu, L. (2015, 10-13 May 2015). Design of three-phase flux reversal machines with fractional-slot windings. 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).
- Gerber, S., & Wang, R. J. (2013a, 13-17 May 2013). Design of a magnetically geared PM machine. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives.
- Gerber, S., & Wang, R. J. (2013b, 25-28 Feb. 2013). Torque capability comparison of two magnetically geared PM machine topologies. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT).
- Gerber, S., & Wang, R. J. (2015a). Design and Evaluation of a Magnetically Geared PM Machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(8), 1-10. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2421474> >.
- Gerber, S., & Wang, R. J. (2015b). Evaluation of Movement Facilitating Techniques for Finite Element Analysis of Magnetically Geared Electrical Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(2), 1-6. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2351787> >.
- Hasanpour, S., Gardner, M. C., Johnson, M., & Toliyat, H. A. (2020, 11-15 Oct. 2020). Comparison of Reluctance and Surface Permanent Magnet Coaxial Magnetic Gears. 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- Huang, C. C., Tsai, M. C., Dorrell, D. G., & Lin, B. J. (2008). Development of a Magnetic Planetary Gearbox. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(3), 403-412. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.914665> >.

- Jang, G. H., Kim, C. W., Seo, S. W., Shin, K. H., Yoon, I. J., & Choi, J. Y. (2019). Torque Characteristic Analysis and Measurement of Magnetic Rack–Pinion Gear Based on Analytical Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(7), 1-5. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2900447> >.
- Jian, L., & Chau, K. T. (2010). A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(2), 319-328. < <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2046997> >.
- Jian, L., Chau, K. T., Gong, Y., Jiang, J. Z., Yu, C., & Li, W. (2009). Comparison of Coaxial Magnetic Gears With Different Topologies. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(10), 4526-4529. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2021662> >.
- Jian, L. N., Chau, K. T., Zhang, D., Jiang, J. Z., & Wang, Z. (2007, 23-27 Sept. 2007). A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation. 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting.
- Jing, L. B., & Zhang, Y. J. (2013, 25-27 Oct. 2013). Exact analytical method for magnetic field computation in the concentric magnetic gear with Halbach permanent-magnet arrays. 2013 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices.
- Johnson, M., Gardner, M. C., & Toliyat, H. A. (2015, 10-13 May 2015). Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays. 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).
- Johnson, M., Gardner, M. C., & Toliyat, H. A. (2017). Design and Analysis of an Axial Flux Magnetically Geared Generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(1), 97-105. < <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2603962> >.
- Khan, S. A., Gardner, M. C., & Duan, G. (2022, 9-13 Oct. 2022). Flux Angle Mapping Coaxial Magnetic Gears for High Gear Ratios. 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- Kikuchi, S., & Tsurumoto, K. (1993). Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29(6), 2923-2925. < <https://doi.org/10.1109/20.280916> >.
- Kucuk, F., & Mousavi, S. (2017, 1-3 June 2017). Development of a novel Coaxial Magnetic Gear. 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA).
- Lee, C. (1963). Vernier motor and its design. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 82(66), 343-349.

- Li, D., Qu, R., & Lipo, T. (2013, 15-19 Sept. 2013). High power factor vernier permanent magnet machines. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- Li, K., Bird, J., Kadel, J., & Williams, W. (2015). A Flux-Focusing Cycloidal Magnetic Gearbox. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2440218> >.
- Li, X., Chau, K.-T., Cheng, M., & Hua, W. (2013). Comparison of magnetic-g geared permanent-magnet machines. *Progress In Electromagnetics Research*, 133, 177-198. < <https://doi.org/10.2528/PIER12080808> >.
- Li, X., Chau, K. T., Cheng, M., Hua, W., & Du, Y. (2011, 20-23 Aug. 2011). An improved coaxial magnetic gear using flux focusing. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems.
- Liu, Y., Li, H. Y., & Zhu, Z. Q. (2018). A High-Power Factor Vernier Machine With Coil Pitch of Two Slot Pitches. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-5. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2839976> >.
- Liu, Y., Yu, H., & Zhang, Q. (2022, 24-26 Oct. 2022). Research on Finite Element Equivalent Models and Analysis of Motion Characteristics of Magnetic Screw for Wave Energy Conversion. 2022 IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC).
- Liu, Y., & Zhu, Z. Q. (2017, 11-14 Aug. 2017). Comparative study of magnetic gearing effect in integral slot, fractional slot winding and vernier PM machines. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- Martin, Jr.( 16 Apr. 1968 ). Magnetic transmission. U.S. Patent 3 378 710.
- Maxwell, A. V16 Training Manual-Lecture 3: Static Magnetic Solvers. In.
- McFarland, J. D., Jahns, T. M., & El-Refaie, A. M. (2014, 2-5 Sept. 2014). Demagnetization performance characteristics of flux switching permanent magnet machines. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- McFarland, J. D., Jahns, T. M., & Refaie, A. M. E.-. (2015). Analysis of the Torque Production Mechanism for Flux-Switching Permanent-Magnet Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(4), 3041-3049. < <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2411655> >.
- Mezani, S., Atallah, K., & Howe, D. (2006). A high-performance axial-field magnetic gear. *Journal of applied physics*, 99(8), 08R303.

- Mizuana, Y., Nakamura, K., Suzuki, Y., Oishi, Y., Tachiya, Y., & Kuritani, K. (2021). Performance Improvement of Spoke-shaped Interior Permanent Magnet Magnetic Gear. *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 45(3), 50-55. < <https://doi.org/10.3379/msjmag.2105R008> >.
- Mushenya, J., & Khan, A. (2021, 22-31 Oct. 2021). Salient Effects of Spoke-Type Permanent Magnets on Power Factor Characteristics of Vernier Machines. 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC).
- Owen, R. L., Zhu, Z. Q., Thomas, A. S., Jewell, G. W., & Howe, D. (2010). Alternate Poles Wound Flux-Switching Permanent-Magnet Brushless AC Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(2), 790-797. < <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2039913> >.
- Qu, R., Li, D., & Wang, J. (2011, 20-23 Aug. 2011). Relationship between magnetic gears and vernier machines. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems.
- Rasmussen, P. O., Mortensen, H. H., Matzen, T. N., Jahns, T. M., & Toliyat, H. A. (2009, 20-24 Sept. 2009). Motor integrated permanent magnet gear with a wide torque-speed range. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- Rauch, S. E., & Johnson, L. J. (1955). Design Principles of Flux-Switch Alternators [includes discussion]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, 74(3), 1261-1268. < <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1955.4499226> >.
- Rens, J., Atallah, K., Calverley, S. D., & Howe, D. (2010). A Novel Magnetic Harmonic Gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(1), 206-212. < <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2036507> >.
- Rens, J., Clark, R., Calverley, S., Atallah, K., & Howe, D. (2008, 6-9 Sept. 2008). Design, analysis and realization of a novel magnetic harmonic gear. 2008 18th International Conference on Electrical Machines.
- Ryu, J., & Hahn, I. (2019, 14-17 Oct. 2019). Axially Stacked Multiphase Flux Reversal Machine. IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Som, D., Li, K., Kadel, J., Wright, J., Modaresahmadi, S., Bird, J. Z., & William, W. (2017). Analysis and Testing of a Coaxial Magnetic Gearbox With Flux Concentration Halbach Rotors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11), 1-6. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2715799> >.

- Tian, Y., Liu, G., Zhao, W., & Ji, J. (2015). Design and Analysis of Coaxial Magnetic Gears Considering Rotor Losses. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2435253> >.
- Tlali, P. M., Wang, R. J., & Gerber, S. (2014, 2-5 Sept. 2014). Magnetic gear technologies: A review. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- Tsai, M. C., & Ku, L. H. (2015). 3-D Printing-Based Design of Axial Flux Magnetic Gear for High Torque Density. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2435817> >.
- Uppalapati, K., & Bird, J. (2012, 27-29 March 2012). A flux focusing ferrite magnetic gear. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012).
- Uppalapati, K. K., Bird, J. Z., Jia, D., Garner, J., & Zhou, A. (2012, 15-20 Sept. 2012). Performance of a magnetic gear using ferrite magnets for low speed ocean power generation. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
- Uppalapati, K. K., Bomela, W., Bird, J. Z., Calvin, M., & Wright, J. (2013, 15-19 Sept. 2013). Construction of a low speed flux focusing magnetic gear. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- Uppalapati, K. K., Bomela, W. B., Bird, J. Z., Calvin, M. D., & Wright, J. D. (2014). Experimental Evaluation of Low-Speed Flux-Focusing Magnetic Gearboxes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(6), 3637-3643. < <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2312551> >.
- Wang, J., Atallah, K., & Wang, W. (2011). Analysis of a Magnetic Screw for High Force Density Linear Electromagnetic Actuators. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 4477-4480. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2157464> >.
- Wang, L. L., Shen, J. X., & Jin, M. J. (2011, 20-23 Aug. 2011). Design of a multi-power-terminals permanent magnet machine with magnetic field modulation. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems.
- Wang, R. J., Brönn, L., Gerber, S., & Tlali, P. M. (2013, 13-17 May 2013). Design and evaluation of a disc-type magnetically geared PM wind generator. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives.
- Wang, Y., Filippini, M., Bianchi, N., & Alotto, P. (2019). A Review on Magnetic Gears: Topologies, Computational Models, and Design Aspects. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5), 4557-4566. < <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2916765> >.

- Wong, H. Y., Baninajar, H., Dechant, B. W., Southwick, P., & Bird, J. Z. (2023). Experimentally Testing a Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear With 279 Nm/L Torque Density. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 38(1), 507-518. < <https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3208320> >.
- Wong, H. Y., Bird, J. Z., Barnett, D., & Williams, W. (2019, 12-15 May 2019). A High Torque Density Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).
- Wu, F., & Refaie, A. M. E.-. (2018, 3-6 Sept. 2018). Permanent Magnet Vernier Machines: A Review. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- Wu, L., & Qu, R. (2019, 11-14 Aug. 2019). A Novel Dual-Stator Permanent Magnet Vernier Machine with Enhanced Torque Density and Power Factor. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- Wu, Z. Z., & Zhu, Z. Q. (2016). Analysis of Magnetic Gearing Effect in Partitioned Stator Switched Flux PM Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(4), 1239-1249. < <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2590988> >.
- Yao, Y. D., Huang, D. R., Hsieh, C. C., Chiang, D. Y., Wang, S. J., & Ying, T. F. (1996). The radial magnetic coupling studies of perpendicular magnetic gears. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(5), 5061-5063. < <https://doi.org/10.1109/20.539490> >.
- Yin, X., Pfister, P. D., & Fang, Y. (2015). A Novel Magnetic Gear: Toward a Higher Torque Density. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11), 1-4. < <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2436058> >.
- Zanis, R., Borisavljevic, A., Jansen, J. W., & Lomonova, E. A. (2014, 22-25 Oct. 2014). Iron loss investigation of miniaturized magnetic gears having solid cores. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
- Zaytoon, H., Abdel-Khalik, A. S., Ahmed, S., & Massoud, A. (2014, 2-5 Sept. 2014). Torque ripple alleviation of a radial magnetic gearbox using step skewing approach. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- Zhang, X., Liu, X., Wang, C., & Chen, Z. (2014). Analysis and Design Optimization of a Coaxial Surface-Mounted Permanent-Magnet Magnetic Gear. *Energies*, 7(12), 8535-8553. < <https://doi.org/10.3390/en7128535> >.
- Zhu, Z. Q. (2018). Overview of novel magnetically geared machines with partitioned stators. *IET Electric Power Applications*, 12(5), 595-604.

Zhu, Z. Q., & Liu, Y. (2018). Analysis of Air-Gap Field Modulation and Magnetic Gearing Effect in Fractional-Slot Concentrated-Winding Permanent-Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(5), 3688-3698. < <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2758747> >