



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA-BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE  
GENIE ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

Présenté par :

**ABAKHMIU Hemza**

**BRAZANE Nassim**

pour l'obtention du diplôme de

## MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option :

### **Machines Electriques**

*Thème*

TRANSMISSION MAGNETIQUE DU MOUVEMENT  
CAS D'UN  
ENGRENAGE MAGNETIQUE CONCENTRIQUE

Encadré par :

**Pr. SAOU Rachid**

# Remerciements

*Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant, le Miséricordieux*

*Nous profitons de cette occasion qui s'offre à nous dans ces quelques lignes, à travers lesquels on tient à adresser nos sincères remerciements aux nombreuses personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'étude, de par leur patience, nous ont fait bénéficier de leur temps et savoir .et plus particulièrement :*

*Le professeur SAOU Rachid, qui nous a tous d'abord offert l'opportunité de faire ce travail ainsi que son aide précieuse à le réaliser, de par ces conseils et son expérience dans le domaine qu'il a partagé avec nous.*

*Egalement on tiens à remercier nos camarades du groupe machines électriques qui, par la confiance, la patience et l'amitié qu'ils ont manifestées à notre égard, nous ont permis d'apprécier pleinement le temps passé à travailler sur ce projet.*

*Nous remercions infiniment nos familles pour leurs soutiens sans faille tout au long de nos études, en nous poussons à aller toujours plus loin et donner le meilleur de nous-même.*

*Nous nous excusons auprès de tous ceux que on a peut oublier de cité, et leur adressons nos plus profonds remerciements.*

*Enfin nous remercions les membres de jurys, qui nous ferons l'honneur de juger notre travail.*

# *Dédicaces*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études*

*A mes chers frères, Yanis et Ferhat, pour leur appui et leur encouragement, ainsi qu'à ma belle-sœur Kḥadîdja.*

*Que ce modeste travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Hemza*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*À mes chers parents.*

*À mes frères et sœurs, ma belle-sœur*

*Aux deux petites Eline et Thanina*

*À tous mes amis (es) et tous ce qui me sont chers.*

*À toutes personnes qui m'ont encouragé et aidé tout au long de mes études.*

*Nassim*

# **TABLE DES MATIERES**

## Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I GENERALITES SUR LES ACCOUPLEMENTS MAGNETIQUES</b> .....	2
<b>I.1 INTRODUCTION</b> .....	3
<b>I.2 ETAT DE L'ART SUR LES ENGRENAGES MAGNETIQUES</b> .....	4
<b>I.3 DEFINITION D'UN COUPLAGE MAGNETIQUE</b> .....	27
<b>I.4 LES DIFFERENTS TYPES DE COUPLAGE MAGNETIQUES</b> .....	27
<b>I.5 LES APPLICATIONS DES ENGRENAGES MAGNETIQUE DANS LE DOMAINE INDUSTRIEL</b> .....	29
I.5.1 Les éoliennes .....	29
I.5.2 Les véhicules Hybrides .....	30
I.5.3 Train à Lévitiation Magnétique .....	33
I.5.4 secteur de la marine.....	36
I.5.5 Secteur de la pétrochimie .....	37
<b>I.6 CONCLUSION</b> .....	37
<b>CHAPITRE II ENGRENAGE MAGNETIQUE CONCENTRIQUE</b> .....	38
<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	39
<b>II.2 PRESENTATION DU MODELE D'ETUDE</b> .....	40
<b>II.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT</b> .....	41
II.3.1 Rapport d'engrenage.....	41
II.3.2 Points d'équilibre .....	49
<b>II.4 IMPACT DES PARAMETRES DE CONSTRUCTION SUR LA VALEUR DU COUPLE</b> .....	50
II.4.1 nombre de paires de pôles <b>P1</b> et <b>P2</b> .....	50
II.4.2 Géométrie des pièces polaires.....	53
II.4.3 Epaisseurs des aimants permanents .....	54
II.4.4 Epaisseurs d'entrefers .....	56
<b>II.5 CONCLUSION</b> .....	57

---

<b>CHAPITRE III CALCULS NUMERIQUE DE L'ENGRENAGE MAGNETIQUE CONCENTRIQUE</b> .....	58
<b>III.1 INTRODUCTION</b> .....	59
<b>III.2 DESCRIPTION DU LOGICIEL UTILISE</b> .....	59
III.2.1 Le préprocesseur.....	59
III.2.2 Le Solver.....	60
III.2.3 Le Post-processeur.....	60
<b>III.3 ENGRENAGE MAGNETIQUE CONCENTRIQUE SOUS FEMM</b> .....	63
<b>III.4 ETUDE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE</b> .....	65
<b>III.5 ETUDE DE L'INDUCTION MAGNETIQUE</b> .....	68
III.5.1 Induction magnétique dans l'entrefer interne.....	68
III.5.2 Induction magnétique dans l'entrefer externe.....	70
<b>III.6 ETUDE DE LA VARIATION DES PARAMETRES</b> .....	71
III.6.1 Effets de l'épaisseur des bagues à aimants sur le couple.....	71
III.6.2 Effets des entrefers sur le couple.....	75
III.6.3 Influence de la nature des aimants.....	78
<b>III.7 CONCLUSION</b> .....	83
 <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	 84
 <b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	 86

## **TABLE DES FIGURES**



## Table des figures

I. 1 Premier engrenage magnétique .....	5
I. 2 Engrenage coaxiale .....	5
I. 3 Engrenage de type denture à aimant permanent.....	6
I. 4 Dispositif à aimant permanent à courroie et à poulie .....	7
I. 5 Engrenage magnétique coaxial.....	8
I. 6 Engrenage magnétique cylindrique avec aimants en U.....	9
I. 7 Engrenage magnétique coaxial.....	9
I. 8 Engrenage magnétique à plusieurs éléments.....	11
I. 9 Engrenage magnétique à denture hélicoïdale à disque axial .....	11
I. 10 Engrenage à vis sans fin magnétique .....	13
I. 11 Engrenage magnétique perpendiculaire .....	13
I. 12 Engrenage magnétique coaxial.....	14
I. 13 Engrenage magnétique coaxial avec des mâchoires de type à rayons sur le rotor interne .....	15
I. 14 A) Engrenage harmonique mécanique. B) Engrenage harmonique magnétique.....	17
I. 15 Engrenage magnétique harmonique plus pratique .....	18
I. 16 Engrenage magnétique harmonique à deux étages.....	19
I. 17 Machine à engrenages magnétiques (avec stator interne) .....	20
I. 18 Rotors internes haute et basse vitesse.....	22
I. 19 Machine sans balais à engrenages magnétiques (sans rotor intérieur) .....	22
I. 20 Configurations du rotor AP intérieur. a) Traditionnelle. b) Proposé.....	23
I. 21 (a) vue en 3D et (b) vue en coupe d'un TROMAG à 12 pôles .....	25
I. 22 Accouplements magnétiques (aimant-aimant) : (a) à flux axial et (b) à flux radial .....	27
I. 23 Accouplements magnétiques à induction : (a) à flux radial et (b) à flux axial.....	28
I. 24 Couplage magnétique pour une utilisation dans les centrales éoliennes .....	29
I. 25 Transmoteur .....	30
I. 26 Eléments du VEH.....	31
I. 27 Train d'un VEH avec un transmoteur .....	32
I. 28 Engrenage magnétique (a) engrenage dans l'axe de la roue (b) ensembles des éléments fondamentaux.....	32
I. 29 Système de propulsion du Maglev .....	34
I. 30 Système de propulsion du Transrapid .....	35
I. 31 Accouplement magnétique MINEX®-S fabriqué par KTR couplé avec une pompe à circulation d'huile dans le secteur de la marine .....	36
I. 32 Pompe hermétique.....	37
II. 1 Engrenage magnétique concentrique .....	39
II. 2 Engrenage magnétique à 17/4 paires de pôles .....	40
II. 3 La modulation de la densité de flux radial due aux pièces polaires dans un engrenage à 4 paires internes et 22 paires de pôles externes .....	41
II. 4 Engrenage mécanique .....	43
II. 5 Engrenage magnétique.....	45
II. 6 Les pièces polaires (Barres ferromagnétiques) fixe ( $\Omega_3 = 0$ ).....	49
II. 7 Courbes de couple révélant des points d'équilibre pour l'engrenage magnétique 22/4.....	50
II. 8 Exemple d'une pièce polaire rectangulaire .....	53
II. 9 Effet de la variation des dimensions de la pièce polaire sur le couple.....	53
II. 10 Effet de la variation d'épaisseurs des aimants permanents sur le couple.....	55
II. 11 Effet de la variation de l'entrefer sur le couple.....	56

---

III. 1 Interface interactive de FEMM.....	62
III. 2 Modèle d'étude.....	63
III. 3 Couple interne en fonction de la position du rotor interne.....	65
III. 4 Couple externe en fonction de la position du rotor externe.....	66
III. 5 Couple interne et externe en fonction de la position des deux rotors.....	67
III. 6 Lignes de champs créent par les aimants du rotor interne.....	68
III. 7 Induction radiale créent dans l'entrefer interne.....	69
III. 8 Ligne de champs créent par les aimants du rotor externe.....	70
III. 9 Induction radiale créent dans l'entrefer externe (par AP rotor externe).....	71
III. 10 Influence de l'épaisseur des aimants permanents du rotor interne sur le couple exercé sur le rotor externe..	72
III. 11 Influence de l'épaisseur des aimants permanents du rotor externe sur le couple exercé sur le rotor externe..	73
III. 12 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux bagues à aimants interne (a) et externe (b) vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe.....	74
III. 13 Influence de l'épaisseur de l'entrefer interne sur le couple exercé sur le rotor externe.....	76
III. 14 Influence de l'épaisseur de l'entrefer externe sur le couple exercé sur le rotor externe.....	76
III. 15 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux entrefers interne et externe vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe.....	77
III. 16 Influence de l'épaisseur des aimants permanents (SmCo) du rotor interne sur le couple exercé sur le rotor externe.....	79
III. 17 Influence de l'épaisseur des aimants permanents (SmCo) du rotor externe sur le couple exercé sur le rotor externe.....	79
III. 18 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux bagues à aimants interne et externe vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe (SmCo).....	80
III. 19 Influence de l'épaisseur de l'entrefer interne sur le couple exercé sur le rotor externe (SmCo).....	81
III. 20 Influence de l'épaisseur de l'entrefer externe sur le couple exercé sur le rotor externe (SmCo).....	81
III. 21 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux entrefers interne et externe vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe (SmCo).....	82

## **LISTE DES TABLEAUX**

## Liste des tableaux

II. 1 Effet des $P1 / P2$ sur le couple. ....	52
III. 1 Dimensions de l'engrenage magnétique concentrique .....	64

# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières années on a pu remarquer que l'utilisation des engrenages magnétiques a connus un grand intérêt et l'évolution qu'il a subie peut nous pousser à le rencontrer dans beaucoup de domaines. On peut prendre pour exemple l'engrenage magnétique concentrique qui offre une densité de couple comparable à celle que donnerait un engrenage mécanique, ce qui nous a amené à nous intéresser à son type et comme on pourrait le voir dans le cadre de ce projet de fin d'étude, nous allons essayer de rassembler toute les informations possibles afin d'illustrer son efficacité et aussi le potentiel qu'il a à offrir.

Bien que le concept d'utilisation d'engrenages magnétiques pour une transmission de couple ne soit pas récente, mais il n'a pas reçu une grande attention à cause de l'utilisation de ferrite à ses débuts, ce qui n'offrait pas le rendement voulu. Cependant l'apparition des aimants permanents à base de terres rares tel l'alliage au néodyme (NdFeB) a relancé l'intérêt à l'utilisation des aimants dans le domaine des engrenages magnétique. Ce qui nous offre pleins d'avantages tel qu'un isolement entre l'entrée et la sortie de l'arbre, moins de bruits pas d'échauffements due aux frottements, ainsi qu'une protection contre les surcharges. Mais les aimants à terres rares n'ont pas que des avantages car leurs coûts de revient limite beaucoup les chercheurs ainsi que leurs développements dans l'industrie.

La supraconductivité existe déjà depuis plus d'un siècle avec des progrès très importants. Elle trouve un essor de plus en plus important en électrotechnique, en particulier dans la conversion électromécanique, qui pourrait apporter un avantage certain aux engrenages magnétique surtout que les supraconducteurs permettent un gain de poids et de volume dans les machines, ce qui offre une opportunité pour les utiliser dans les domaines aéroportuaires et spatiaux.

Dans ce projet de fin d'étude nous allons utiliser un outil d'analyse pour les calculs de couples et d'inductions magnétique à deux dimension appelé FEMM (Finite Element Method Magnetics) qui consiste à faire une étude par éléments finis de l'engrenage magnétique. Les équations simples qui modélisent ces éléments finis sont ensuite assemblées dans un système d'équations plus large qui modélise l'ensemble du problème utilisant ensuite des méthodes variationnelle du calcul des variations pour approcher une solution en minimisant une fonction d'erreur associée.

Ce mémoire est composé de trois chapitres, dont le premier consiste à présenter des généralités sur les accouplements magnétiques et ses différentes applications.

Dans le deuxième chapitre notre étude va cibler les engrenages magnétiques concentriques, leurs principes de fonctionnement, ainsi que l'influence des paramètres de conception sur la valeur du couple.

Le troisième chapitre est consacré aux calculs numériques de l'engrenage magnétique concentrique, ou nous allons calculer les couples statiques et l'induction magnétique en utilisant le logiciel de calcul par éléments finis (FEMM).

**CHAPITRE I**  
**GENERALITES SUR LES ACCOUPLEMENTS**  
**MAGNETIQUES**



## I.1 INTRODUCTION

La plupart des machines et petits appareils qui nous entourent fonctionnent grâce à des mécanismes. Qu'ils transmettent un mouvement ou qu'ils le transforment, sans eux la plupart des machines ne seraient d'aucune utilité malgré toute l'énergie que l'on pourrait déployer. Engrenage, bielle-manivelle, pignon-crémaillère, poulie et courroie, chaîne et roue dentée seront bientôt que de l'histoire ancienne car ils pourraient être remplacés très vite par les nouveaux engrenages magnétiques avec lesquels non seulement nous aurons une meilleure densité de couple mais aussi moins de maintenance à effectuer. Ses avantages pratiques sont nombreux : ces engrenages ne nécessitent pas de lubrifiant, l'absence de contact et donc de frottement entre les deux axes ne détériore pas l'engrenage et lui assure une durée de vie plus longue, la transmission peut en outre être réalisée à travers une paroi et sans bruit. De plus, une surcharge sur l'axe de sortie ne provoque pas la rupture de l'engrenage. Cette technologie a également été mise en œuvre dans un environnement cryogénique ou le dispositif pourrait fonctionner dans le vide et à des températures extrêmement basses, en utilisant des aimants supraconducteurs, ce qui ouvre des applications dans l'industriel spatiale.

Dans ce chapitre, nous aborderons dans une première partie l'accouplement magnétique ainsi que les différents types d'accouplements existant, et dans la deuxième partie les domaines d'application dans l'industrie.

Ce modèle de transmission sert à remplacer la transmission mécanique déjà existante ainsi qu'à la perfectionner de telle manière à réduire les problèmes de maintenance et de lubrification et la surchauffe causée par la transmission mécanique.

L'Engrenage mécanique a été découvert par Aristote en 330 AV. J-C, et a été aussi utilisé dans les chariots par l'empereur de chine plus de 4500 ans avant. Les premiers engrenages on était construit en bois, fait à la main sans aucunes connaissances en ingénierie mécanique. Aux alentours de 1500, L'espagnole Juanelo Torriano a construit la première machine a engrenage connue (Le moine mécanique). Après, le domaine d'engrenage a connu un nouvel air. Vers 1800, L'engrenage métallique a évolué de la simple utilisation telle que dans les horloges à une grande demande de puissance.

Si l'engrenage magnétique est destiné à remplacer l'engrenage mécanique dans de nombreuses applications, donc les paramètres doivent être étudiés afin de trouver un moyen de

comparaison. D'une manière générale, la disposition de l'engrenage magnétique a été inspiré de celle de l'engrenage mécanique.

## I.2 ETAT DE L'ART SUR LES ENGRENAGES MAGNETIQUES

Les engrenages magnétiques remontent au 20ème siècle. Armstrong [CA01] a conçu un engrenage cylindrique électromagnétique en 1901. L'engrenage se composait de deux engrenages, l'un avec des électro-aimants comme les dents d'engrenage et l'autre avec des pièces d'acier. Les électro-aimants de l'engrenage primaire étaient allumés et éteints en fonction de leur position relative par rapport aux dents d'engrenage secondaires. Une illustration peut être vue dans la figure I.1. L'engrenage avait l'avantage d'un transfert de puissance sans contact et d'un fonctionnement à faible bruit, mais il manquait le couple pouvant être transféré pour le volume occupé. Seulement un à trois électroaimants ont transmis le couple à un moment donné. Les électro-aimants devaient être connectés électriquement avec des bagues collectrices, ce qui causait des pertes inutiles et nécessitait un entretien important. En 1916, Neuland [AN16] a inventé un engrenage magnétique de loin supérieur. L'engrenage se composait de trois parties principales, un rotor extérieur et intérieur en acier laminé et des pièces de modulation magnétique entre les deux rotors en acier (voir la figure I.2). Les pièces de modulation ont été façonnées pour moduler le flux magnétique de sorte que le rotor interne et le rotor externe ont vu les harmoniques correctes en fonction du nombre de dents sur chaque arbre. Le rapport des dents sur le rotor externe et interne détermine le rapport d'engrenage entre les arbres. La densité de couple de cette configuration a été grandement améliorée par rapport au type à impulsion

La figure suivante montre la conception de [CA01]. Le brevet décrit également quelques variantes de conception. Le problème avec cette conception était qu'il n'y avait que des aimants sur l'un des arbres, ce qui conduit à des tailles d'entrefer peu pratiques.

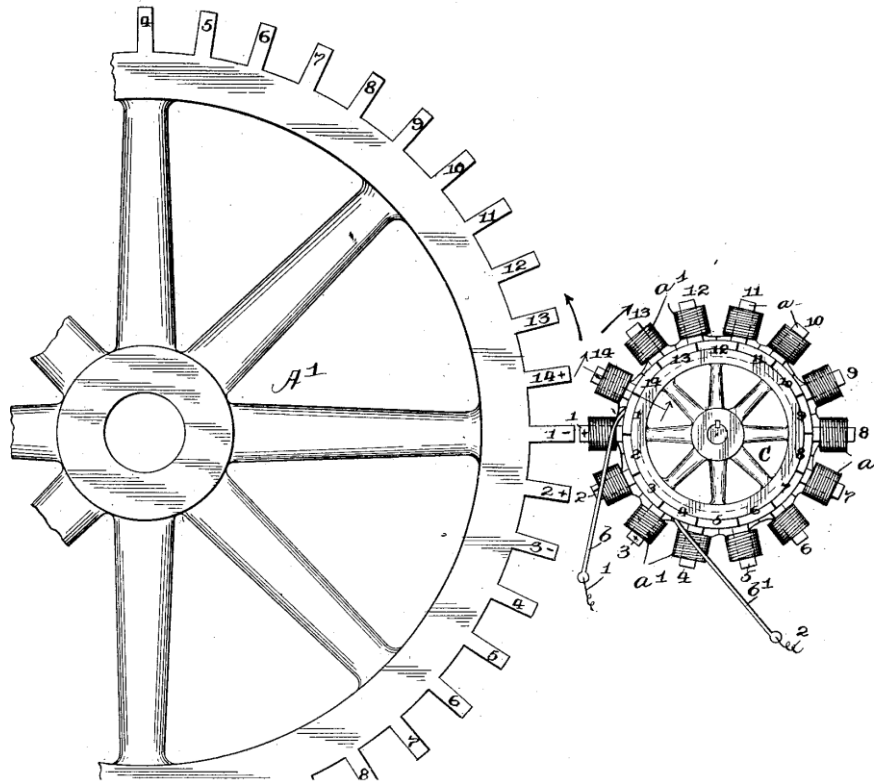


Figure I. 1 Premier engrenage magnétique [CA01]

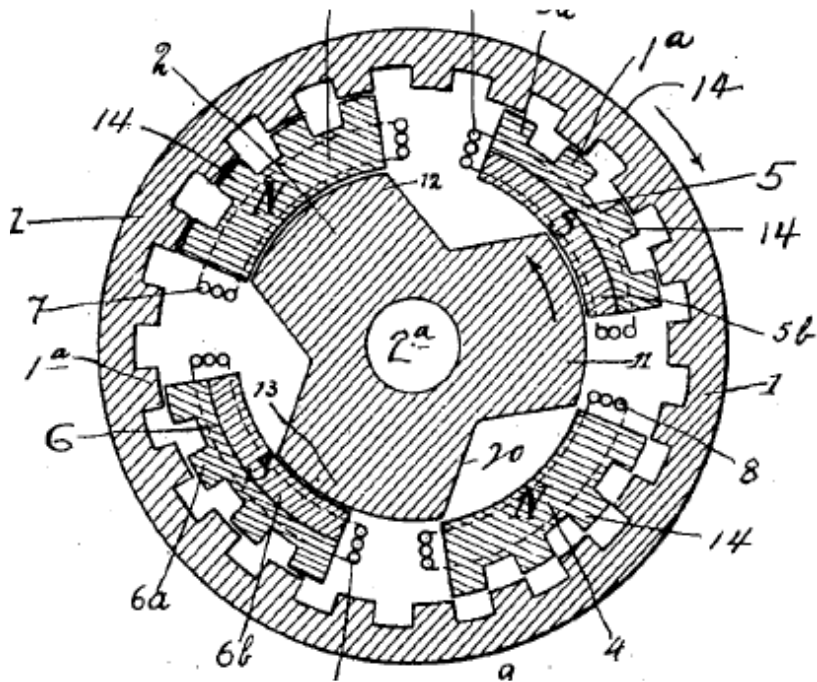


Figure I. 2 Engrenage coaxiale [AN16]

H.T. Faus a conçu un engrenage magnétique en 1941 [HF41]. L'engrenage fonctionnait de la même manière que l'engrenage droit électromagnétique de [CA01] comme décrit ci-dessus. La seule différence était qu'elle utilisait des aimants permanents (voir la figure I.3 qui illustre le dessin original du brevet). Tous les pôles nord des aimants pointés radialement vers l'extérieur, ainsi le couple était transféré entre les arbres par la répulsion des pôles identiques des aimants. Lorsque le couple maximal a été dépassé dans cette conception, l'engrenage a glissé et a causé la rupture de l'un des aimants permanents, puisqu'ils sont rentrés en contact. Cette conception n'était donc pas appropriée lorsqu'une protection contre les surcharges était nécessaire. Bien qu'il ait amélioré les conceptions précédentes de type à ergots en éliminant les électro-aimants, ce qui a diminué le poids et la taille de l'engrenage tout en rendant le circuit de commande dispensable, la faible utilisation des aimants permanents dans la conception de type perforateur rendait la conception inadaptée. Dans le brevet, un engrenage à vis sans fin a également été décrit.

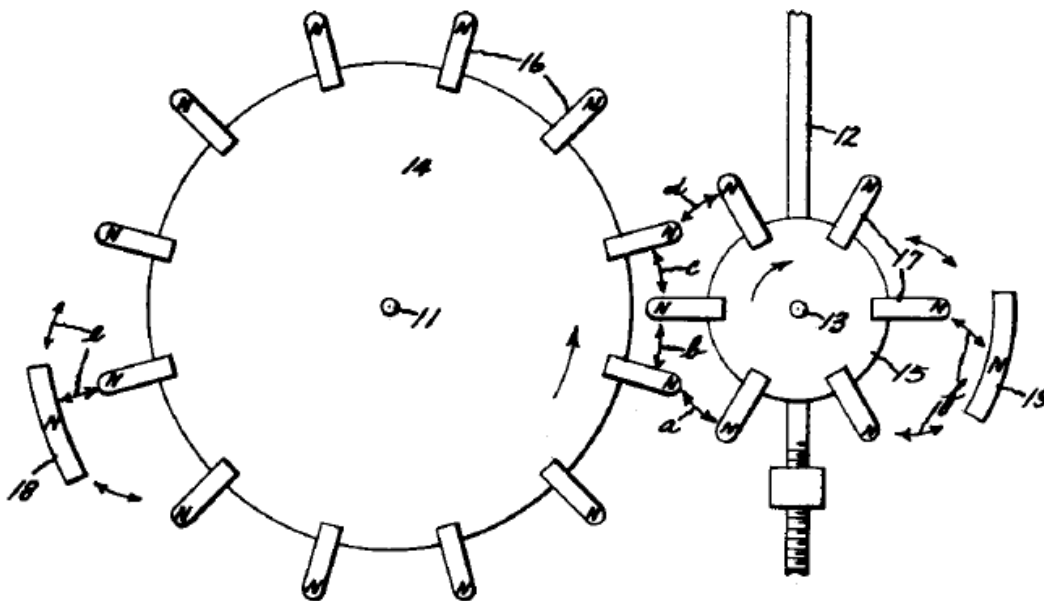


Figure I. 3 Engrenage de type denture à aimant permanent [HF41]

Avec l'évolution de la maîtrise des aimants permanents En 1951, Hurvitz [H51] a inventé une boîte de vitesses magnétique de type à engrenages, où le rapport de vitesse pourrait être changé en commutant les vitesses actives en commutant les engrenages actifs au moyen d'électro-aimants. L'ensemble du système n'était pas efficace et très encombrant. En 1955, le brevet de Cluwen [C55] décrivait un certain nombre d'engrenages magnétiques de type à engrenages cylindriques à engrenages droits, dans lesquels le rapport d'engrenage pouvait être modifié en déplaçant mécaniquement l'arbre entraîné dans une nouvelle position. Le brevet décrit également des agencements d'engrenages dans lesquels les axes de rotation sont inclinés l'un par rapport à l'autre. En 1966, Baermann [B66] a inventé un appareil pour la production d'électricité. Le dispositif était un système de courroie et de poulie fait d'aimants permanents (voir la figure I.4). La courroie a ensuite été déplacée devant des bobines électriques, où les aimants en mouvement ont induit un courant électrique dans les bobines. Le mouvement de la courroie était accompli par l'attraction magnétique entre les pôles de la courroie et les poulies.

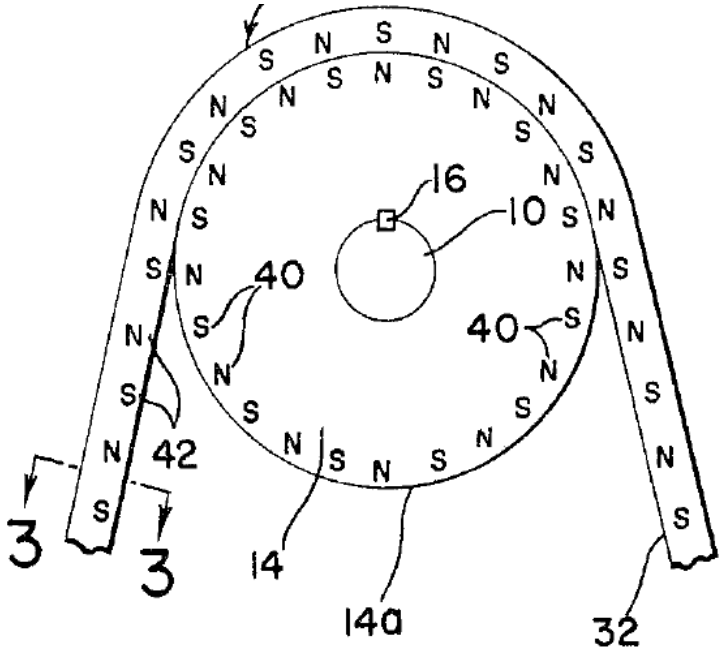


Figure I. 4 Dispositif à aimant permanent à courroie et à poulie [B66]

En 1967, Reese [R67] a inventé un engrenage magnétique similaire à celui décrit dans [AN16]. La différence était que le rotor intérieur contenait des aimants permanents. Les deux rotors extérieurs avaient un nombre de dents différent. Le rotor à aimants permanents intérieur était l'arbre à grande vitesse, le rotor du milieu était l'arbre de sortie et le rotor extérieur était maintenu immobile. Lorsque les aimants permanents internes étaient tournés, le rotor du milieu tournait avec lui. Le flux magnétique des particules a tendance à prendre le chemin avec la plus faible perméabilité, qui est à travers les dents en acier des rotors. Cela a fait tourner les dents du rotor en fonction du flux magnétique des aimants permanents. La vitesse du rotor est alors en fonction du rapport entre le nombre de dents entre les rotors et le nombre de pôles à aimants permanents.

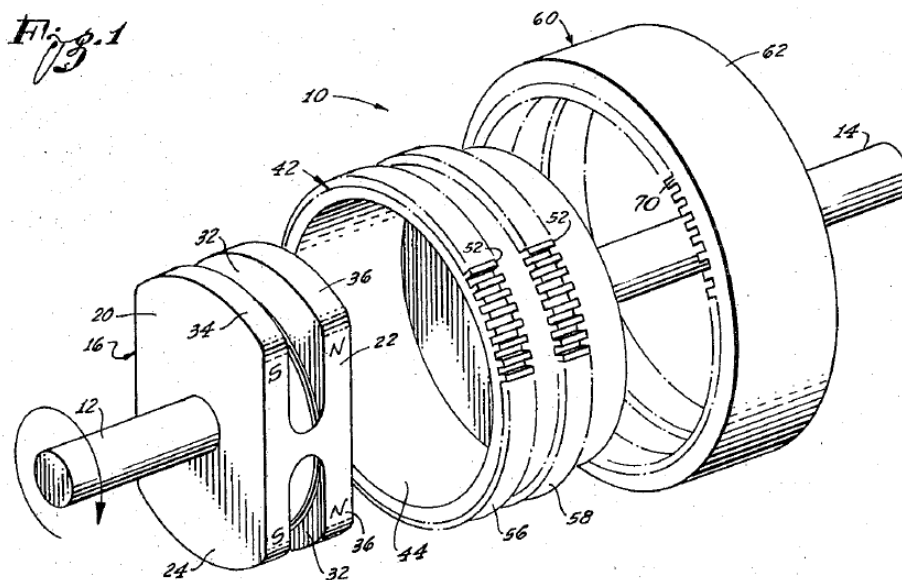


Figure I. 5 Engrenage magnétique coaxial [R67]

En 1970, Rand [R70] a obtenu un brevet pour un simple engrenage magnétique de type à ergot. Il a conçu les aimants permanents de manière à ce que les pôles nord et sud des aimants permanents soient orientés radialement vers l'extérieur (voir la figure I.6). Cela a augmenté la quantité de matériau magnétique nécessaire et le coût de fabrication. En 1972, Laing [L72] a obtenu un brevet pour un engrenage magnétique que le modulateur de flux entre les rotors à aimants permanents était un peu différent et que seulement un deuxième pôle sur les rotors contenait un aimant permanent (voir la figure I.7).

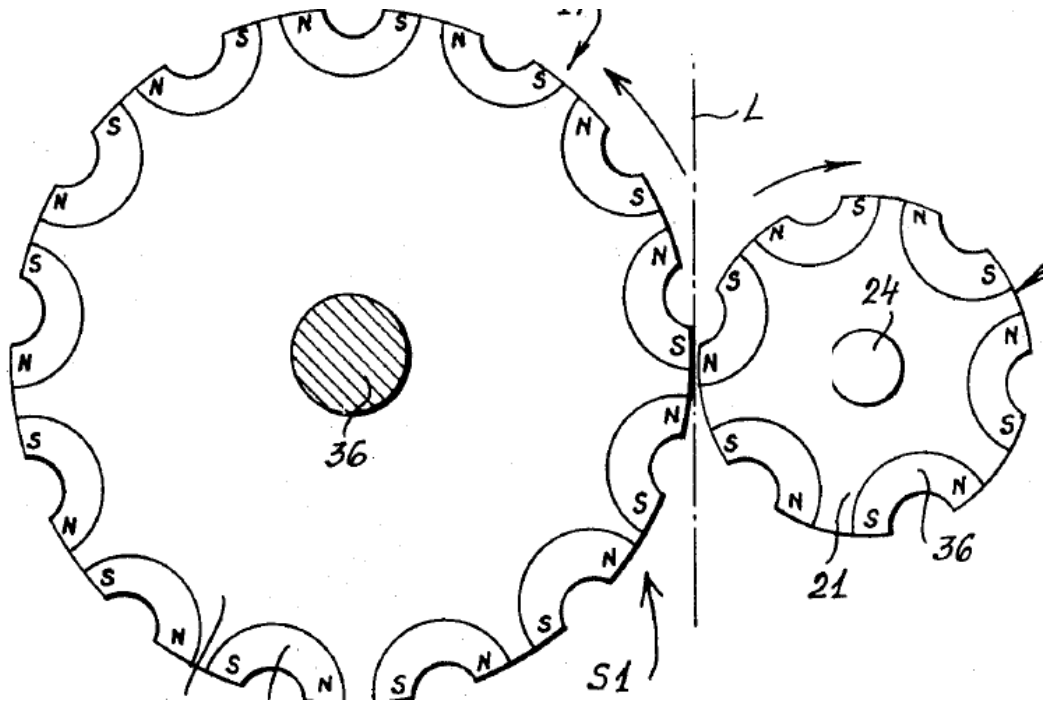


Figure I. 6 Engrenage magnétique cylindrique avec aimants en U [R70]

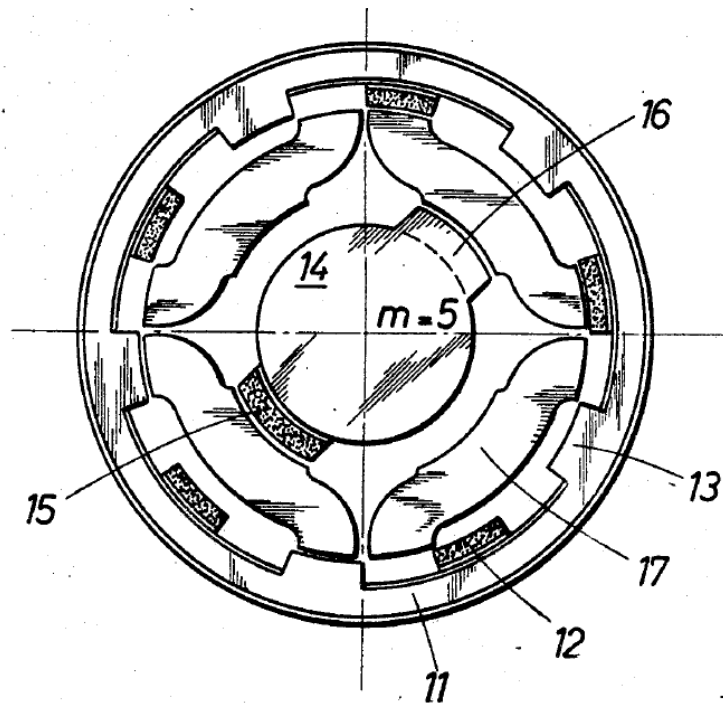


Figure I. 7 Engrenage magnétique coaxial utilisé dans [R70]

En 1973, Laing a sorti un autre brevet, [L73], qui décrit l'engrenage magnétique incorporé dans une pompe centrifuge. L'avantage de l'utilisation d'un engrenage magnétique dans une pompe est que les deux arbres rotatifs transmettent le couple sans contact physique, ce qui permet d'assurer l'étanchéité de la pompe.

Dans les années 1980, avec l'apparition des aimants permanents à base de terres rares, tels que l'aimant néodyme-fer-bore (NdFeB) [LBS85], le concept d'engrenages magnétiques a commencé à avoir plus d'intérêt pour les gens. Les aimants permanents à terres rares ont la capacité de produire un champ magnétique très fort sans excitation extérieure continue. Un travail précoce a été fait par Tsurumoto [TK87- KT88] avec des engrenages magnétiques non concentriques utilisant des aimants de Samarium Cobalt. Plus de recherche et de prototypes suivis avec l'engrenage magnétique planétaire concentrique dans [ATA01], [RAN3], et [WA9]

Hesmondhalgh et ses collaborateurs (1980) [HT80] ont proposé une gamme d'engrenages magnétiques [AN16] de Neuland (voir la Figure I.8), dans l'espoir que le réseau d'engrenages augmenterait le couple et l'efficacité maximum et réduirait le couple de crantage. Cependant, l'efficacité totale du système était très faible et les engrenages combinés rendaient l'ensemble du système trop vaste et complexe. K. Tsurumoto a été l'inventeur de l'engrenage magnétique à denture hélicoïdale à disque axial (voir Figure I.9). En 1987 Tsurumoto [TK87] a publié son premier article sur l'engrenage magnétique sans contact. Le matériau à aimant permanent utilisé était le samarium-cobalt. L'engrenage avait un rapport de démultiplication de 1/3. Le couple maximal pouvant être transféré était de 5,5 Nm.

En 1988, il a décrit une tentative d'amélioration de la performance de l'engrenage en montant les aimants directement sur une plaque d'acier doux ou un joug [KT88]. Sa conclusion était que des engrenages identiques pourraient être utilisés pour le maillage interne et externe.



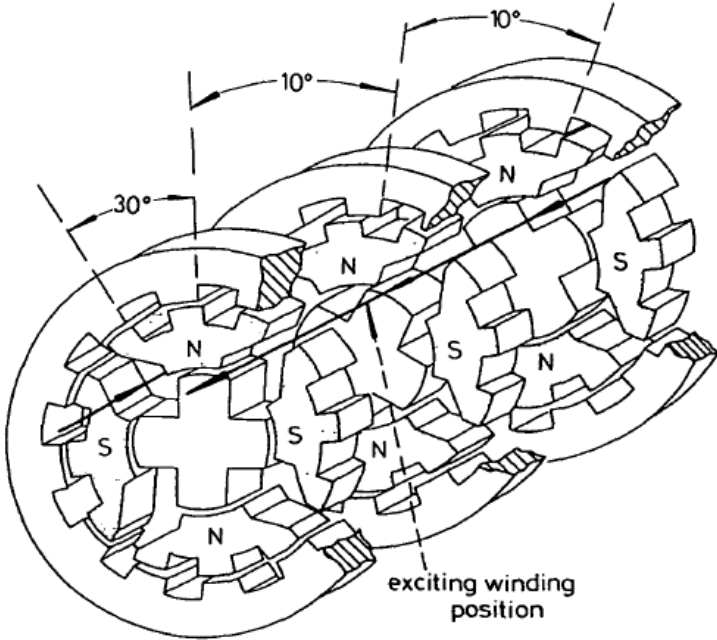


Figure I. 8 Engrenage magnétique à plusieurs éléments [HT80]

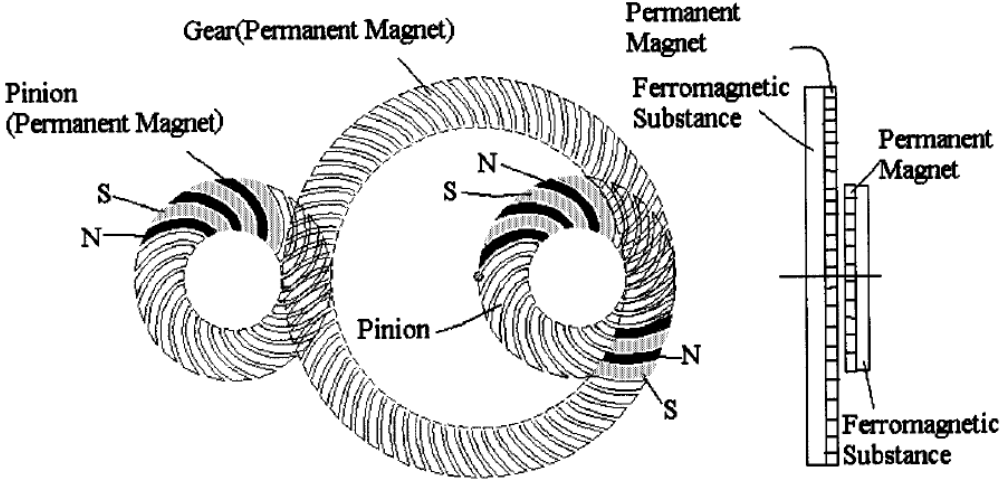


Figure I. 9 Engrenage magnétique à denture hélicoïdale à disque axial [TK87]

Le document suivant a été publié en 1989, [T89], il s'est étendu sur l'article précédent et a conclu que le couple de sortie pourrait être 3,2 fois amélioré si les aimants étaient placés sur des chapes. Tsurumoto a publié un autre article en 1990, [T89], dans lequel il a décrit la zone de conception et de chevauchement des particules et les caractéristiques de performance des engrenages magnétiques à arc de cercle. Il a conclu que les engrenages magnétiques à arcs circulaires sont 6% plus efficaces que ceux de son design original. L'augmentation de l'efficacité était due au matériau supplémentaire dans la zone de maillage.

Dans [T91], Tsurumoto a étudié le mécanisme par lequel une force magnétique était générée dans la zone d'engrènement des deux rotors opposés. En 1992, il a écrit un article [T92] sur l'utilisation d'un modèle bidimensionnel ou a été utilisé une approximation de la force magnétique générée entre les principales zones de contact et d'intersection d'un engrenage magnétique en utilisant des aimants permanents.

Un autre document intéressant [TTO2] a été écrit en 2002 pour décrire un engrenage magnétique à flux axial supraconducteur. Les aimants supraconducteurs peuvent être plusieurs fois plus forts que les aimants de terres rares. Cependant ceci a exigé la réfrigération constante qui a augmenté la taille et la masse totales. L'auteur a également décrit le développement d'un programme d'analyse de champ électromagnétique tridimensionnel pour analyser les caractéristiques de l'engin proposé. Deux engrenages magnétiques supraconducteurs avec des configurations différentes ont été fabriqués et testés. Les résultats du test n'ont pas montré un bon accord avec les résultats calculés, en raison de la dispersion dans les résultats expérimentaux. Les engrenages magnétiques supraconducteurs pourraient grandement améliorer le couple maximal pouvant être transféré par rapport aux engrenages magnétiques permanents normaux.

Dans l'article suivant [K93], un engrenage à vis sans fin magnétique a été décrit (1993). L'équipement proposé à un rapport de démultiplication de 1:33. La conception originale avait une faible capacité de couple maximum, en raison d'un grand entrefer. L'entrefer a ensuite été diminué en accouplant l'engrenage à vis sans fin avec la roue (comme on peut le voir sur la figure I.10) et le couple de sortie a augmenté d'environ 1,5 fois. Cependant, les pièces complexes ont augmenté les coûts de fabrication et d'assemblage. L'engrenage à vis sans fin était réalisable mais la complexité et les coûts de fabrication n'étaient valables que dans les applications où les avantages des engrenages magnétiques étaient nécessaires.

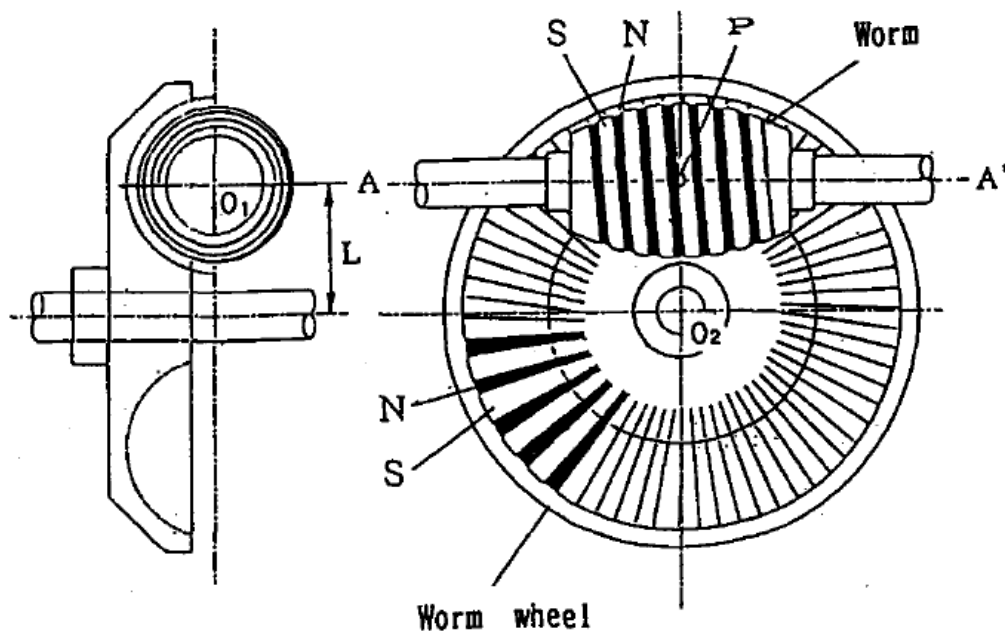


Figure I. 10 Engrenage à vis sans fin magnétique [K93]

Les engrenages magnétiques ont été discutés dans [KT94, KHO2]. L'engin consistait en deux vis sans fin et aucun engrenage de roue. Ainsi, seule une petite zone magnétique était responsable du transfert de couple à un instant donné. Cette conception était pire que la conception de 1993 en raison de la petite superficie qui pourrait être utilisée pour transférer l'énergie, mais le coût de fabrication a été diminué.

En 1996, un article [YHY96] a été publié où un engin magnétique perpendiculaire a été conçu, construit et évalué expérimentalement (une illustration de l'engin proposé peut être vue sur la figure I.11). L'article décrivait une distance de séparation critique ( $d$  sur la Figure I.11) où, si la longueur de l'entrefer était inférieure à la distance critique le couple transmis pourrait être augmenté en augmentant le nombre de pôles.

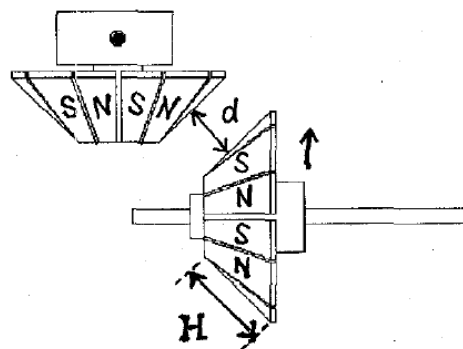


Figure I. 11 Engrenage magnétique perpendiculaire [YHY96]

Yao et ses collaborateurs (de 1996 à 1997) a décrit le couplage entre engrenages magnétiques de type éperon le premier article, [YHW96], a décrit le couplage d'engrenages magnétiques de type éperon avec l'analyse par éléments finis (AEF) à deux et trois dimensions. La conclusion était que pour un entrefer de 2mm, le couple pouvait être augmenté en augmentant le nombre de pôles. Le couple est inversement proportionnel au nombre de pôles lorsque le nombre de pôles est supérieur à dix.

Dans son autre article [YHY97], les conclusions d'optimisation d'une simulation 2D AEF ont été décrites. Il a été conclu qu'avec une distance d'entrefer fixe, un couple maximum pouvait être obtenu pour un nombre donné de pôles. Le nombre de pôles augmente à mesure que le rapport du rayon à l'épaisseur des aimants augmente. Le nombre de pôles a diminué quand un joug de fer a été ajouté. Dans l'article suivant [DJ8], les auteurs ont tenté de prouver les conclusions des deux articles précédents par des tests expérimentaux. Furlani [F97] a présenté une formule pour calculer le couplage entre type éperon engrenages magnétiques en 1997. La formule était basée sur deux dimensions analytiques et a été exprimée comme une somme finie de fonctions élémentaires. La formule a été démontrée pratiquement et a été vérifiée en utilisant 2D AEF. La formule était idéale pour l'analyse paramétrique.

Atallah et ses collaborateurs (2001) a écrit un article [ATA01] sur un "nouvel" engin magnétique. L'engrenage était fondamentalement le même que celui d'Ackermann en 1997, sauf que le modulateur de flux n'était pas connecté (voir Figure I.12). Dans le document, la relation entre le nombre de pôles et le nombre de pièces de modulation dans l'engrenage a été décrite pour déterminer le rapport d'engrenage. Il a été avancé que l'utilisation d'aimants à base de terres rares permettrait d'atteindre une densité de couple supérieure à  $100 \text{ KNm} / \text{m}^3$ .

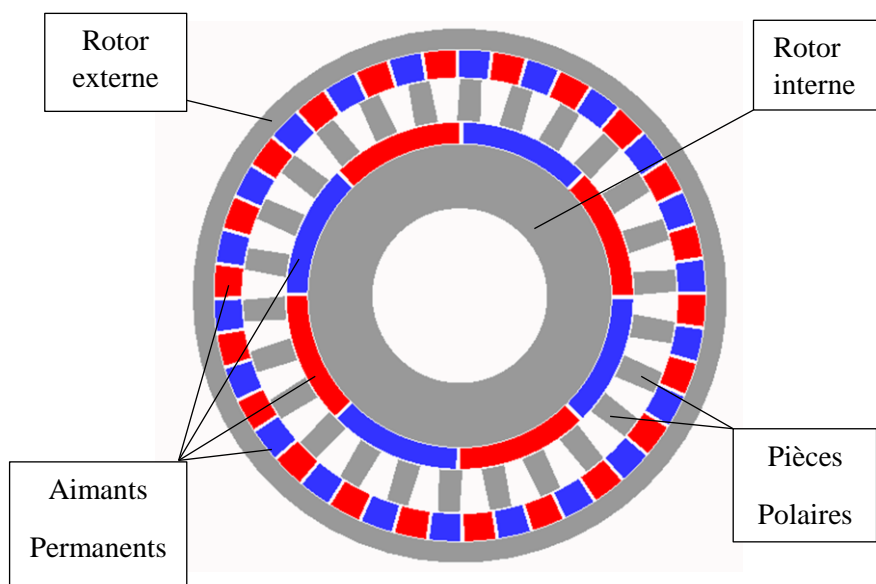


Figure I. 12 Engrenage magnétique coaxial [ATA01]

En 2003, Rasmussen écrivit un papier [RAN3], sur un engrenage magnétique coaxial, comme décrit ci-dessus, sauf que les aimants du rotor intérieur étaient disposés dans un arrangement de type à rayons et non montés en surface (voir Figure I.13). Il a été calculé que l'engrenage aurait un rapport d'engrenage de 1: 5,5 et un couple de décrochage de 27 Nm. Cependant, les résultats expérimentaux ont montré un couple de décrochage de seulement 16 Nm. La réduction du couple de décrochage semble être provoquée par les effets de fin de la courte longueur d'empilement des aimants. Dans le papier EM est également comparé aux engrenages mécaniques conventionnels avec le même rapport de démultiplication et les capacités de couple maximum. Il a été conclu qu'une efficacité théorique de 96% pouvait être atteinte si les pertes finales étaient minimisées et que l'engrenage avait une densité de couple plus élevée que les autres engrenages mécaniques.

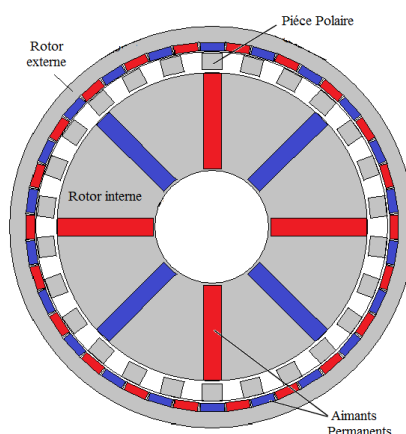


Figure I. 13 Engrenage magnétique coaxial avec des mâchoires de type à rayons sur le rotor interne [RAN3]

En 2004 Atallah et ses collaborateurs [AH4] ont amélioré leur précédent article sur les engrenages magnétiques coaxiaux en démontrant qu'un rendement de 97% pouvait être atteint pour des valeurs de couple transmises supérieures à 75% du couple de décrochage.

Atallah et ses collaborateurs en 2005 a publié un article [AH5] sur un engrenage magnétique linéaire. L'engrenage fonctionne sur le même principe que l'engrenage magnétique coaxial. Il y avait trois parties qui se déplaçaient l'une par rapport à l'autre: deux armatures des AP connectées à des jougs en acier et un noyau de modulateur de flux. Le cœur du modulateur de flux modulait le flux magnétique entre les armatures d'AP intérieure et extérieure, de sorte que les culasses d'AP interagissaient avec le nombre correct de pôles (harmoniques correctes de l'espace). L'engrenage linéaire proposé a été simulé et les résultats ont montré qu'une densité de couple de  $1,7 \text{ Nm/m}^3$  pouvait être obtenue. Il a également été montré qu'avec un engrenage

magnétique linéaire combiné avec un linéaire électrique, la machine pourrait obtenir une densité de force élevée, même avec un rapport d'engrenage relativement faible.

Dans [WA9], des enroulements ont été placés à l'extérieur de l'engrenage magnétique planétaire concentrique pour aider à amortir la boîte de vitesses contre les réponses transitoires.

En 2007, un article intéressant [SCW7] a fait surface, dans lequel les résultats expérimentaux pour l'application d'une boîte de vitesses magnétique coaxiale utilisée dans une turbine marémotrice contrarotative étaient décrits. La turbine marémotrice contrarotative constituée de deux ensembles de pales; la lame en amont a tourné dans le sens des aiguilles d'une montre tandis que la lame en aval a tourné dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. La pale en amont était connectée au rotor externe à faible vitesse et la pale en aval était connectée au modulateur de flux de l'engrenage magnétique coaxial. La boîte de transmission magnétique coaxiale combinait la sortie des deux arbres contrarotatifs en un seul arbre tournant à grande vitesse (rotor interne). Un prototype complet avec les lames a dû être construit afin de tester le système. Dans la même année, il écrivit un autre article [JCGJYL9], dans lequel deux engrenages magnétiques coaxiaux étaient comparés l'un à l'autre avec des AP magnétisés radialement et l'autre avec des AP magnétisés par halbach. L'analyse a montré que les AP magnétisés par halbach pouvaient offrir un couple d'arrachement plus élevé, une ondulation de couple plus faible et des pertes de fer plus faibles que les AP à aimantation radiale. Dans [YJKY8], un engrenage magnétique planétaire concentrique a été construit qui utilisait une configuration de flux axial pour les pièces polaires du stator, au lieu d'une configuration de flux radial.

D'autres conceptions ont également commencé à apparaître pour atteindre des évaluations de densité de couple plus élevées. Haung et ses collaborateurs en 2008 a écrit un document détaillé, [HTDL8], sur un engrenage planétaire magnétique. L'arrangement d'engrenages avait un soleil, des planètes et une couronne très semblable aux engrenages planétaires mécaniques conventionnels. La différence était que chaque dent était remplacée par un AP le couple maximal pourrait être augmenté en augmentant le nombre de planètes, mais en augmentant le nombre de planètes, le couple de détente serait également augmenté. La boîte de vitesses construite présentait une densité de couple maximale de  $100 \text{ KNm} / \text{m}^3$ .

Dans [RCCAH10], l'engrenage magnétique harmonique a été étudié et construit. Dans cette conception, au lieu d'utiliser une action cycloïde pour moduler l'entrefer entre les anneaux magnétiques, un rotor flexible a été proposé. Dans lequel le rotor interne changerait de forme

et donc l'entrefer. Rens et ses collaborateurs [RAH7] 2007 ont proposé un engrenage magnétique harmonique. Le principe de fonctionnement de l'engrenage proposé est similaire à celui d'un engrenage harmonique mécanique (voir Figure I.14). Le principe de fonctionnement d'un engrenage harmonique était tel qu'une entrée à grande vitesse sur le générateur d'ondes a provoqué l'entraînement des dents de l'engrenage sur la cannelure flexible (entrée) pour venir en prise avec les dents internes de la cannelure circulaire (sortie). Comme la cannelure flexible avait deux dents de moins que la cannelure circulaire, chaque révolution de l'entrée provoquait un déplacement de la dent à deux dents. (La figure I.14B montre une version magnétique). Pour l'engrenage à harmoniques magnétiques, le rotor à haute vitesse déforma le rotor flexible à basse vitesse qui tournait à l'intérieur du stator externe rigide. La variation sinusoïdale variant dans le temps de la longueur d'entrefer modulait le champ produit par les aimants sur le rotor à basse vitesse et produisait un champ harmonique spatial asynchrone dominant qui interagissait avec les aimants du stator pour faciliter la transmission du couple et l'action de l'engrenage magnétique.

L'engrenage harmonique était encore compliqué par la nécessité d'un ensemble de rotor à faible vitesse à aimants permanents flexible. Une façon de simplifier la conception et de la rendre plus pratique consistait à utiliser un rotor rigide à basse vitesse entraîné de façon excentrique par le rotor à grande vitesse de sorte qu'une seule variation cyclique de l'entrefer se produise entre les aimants permanents sur le rotor à basse vitesse et le stator (voir Figure I.15). Cette version était bien meilleure que la version flexible (comme on peut le voir en I.14B) mais pas sans complexités.

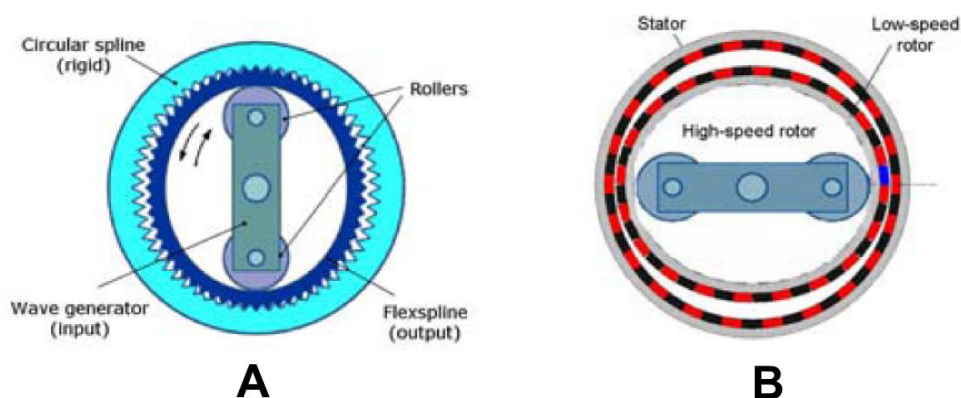


Figure I. 14 A) Engrenage harmonique mécanique. B) Engrenage harmonique magnétique [RAH7]



Figure I. 15 Engrenage magnétique harmonique plus pratique [RAH7]

Le problème avec cette conception est que le rotor rigide à basse vitesse a tourné de manière excentrique; l'arbre de sortie devait être relié à ce rotor rigide à faible vitesse excentrique et cela ne pouvait se faire qu'avec un accouplement flexible ou avec deux paliers l'un dans l'autre mais avec la même distance excentrique. (La figure II.16 montre les roulements cycloïdaux avec la distance excentrique entre les roulements). Un autre problème associé à la distance excentrique est qu'une force magnétique déséquilibrée a été générée parce qu'un côté du rotor à grande vitesse était toujours plus proche du rotor à basse vitesse (l'intervalle d'air variable).

Rens et ses collaborateurs (2007), [RAH7] ont proposé un engrenage harmonique magnétique à deux étages (voir Figure I.16). Ceci éliminait le besoin d'un accouplement flexible et augmentait encore le rapport d'engrenage. Il a été démontré dans le document qu'un réducteur harmonique à deux étages pouvait obtenir des rapports de démultiplication très élevés. Des densités de couple allant jusqu'à  $110 \text{ KNm/m}^3$  ont pu être atteintes et le couple transmis n'a pas présenté d'ondulation de couple. Enfin, l'engrenage magnétique harmonique à deux étages présentait un rapport d'engrenage plus élevé que le produit des rapports des étages individuels.



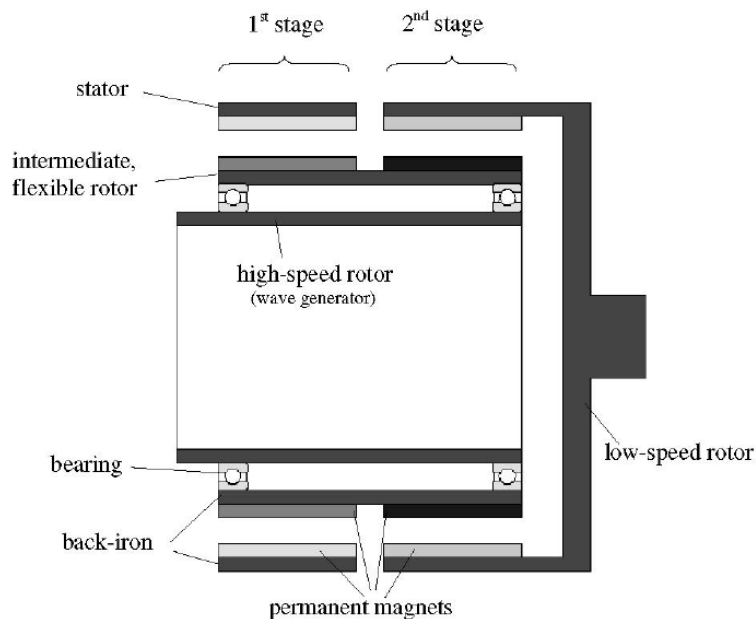


Figure I. 16 Engrenage magnétique harmonique à deux étages [RAH7]

En 2008, Jorgensen et ses collaborateurs ont écrit un article, [JAR8], sur un engin harmonique à deux étages identiques. La deuxième étape a été placée de telle sorte que la force déséquilibrée de l'entrefer variable du premier étage a été annulée par la force déséquilibrée de la deuxième étape. Le problème avec cette disposition était que le mouvement cycloïde des deux étages devait être transféré de l'un à l'autre et à l'arbre de sortie. Le problème a été résolu en utilisant des appuis cycloïdaux. Cependant, 12 roulements ont été nécessaires pour résoudre le mouvement de cycloïde, qui à son tour a causé des pertes supplémentaires. Malgré tous les roulements supplémentaires, la boîte de vitesses proposée a réussi à atteindre une efficacité de plus de 90%.

Chau et ses collaborateurs a publié un article [CZZ7] sur une nouvelle conception intégrée en 2007. Le document décrit un moteur sans balai à courant continu à AP intégré dans un engrenage magnétique coaxial. La machine était semblable à la conception de Razzel de 2004 (voir la figure I.17). Le système combiné offrait les capacités à faible vitesse des engrenages magnétiques et les exigences de vitesse élevée pour la conception de moteurs compacts, ce qui donnait au système combiné une densité de couple élevée et un rendement élevé à des vitesses relativement faibles. La machine a été proposée pour les véhicules électriques. Le moteur proposé avait des enroulements de fente fractionnés qui diminuaient le couple de crantage. Le moteur sans la boîte de vitesses avait un couple maximum de sortie de 15 Nm, ce qui était insuffisant pour lancer le véhicule. Avec la boîte de vitesses, le couple de sortie a été augmenté à 103 Nm, presque 7 fois plus grand, ce qui était suffisant pour lancer le véhicule.

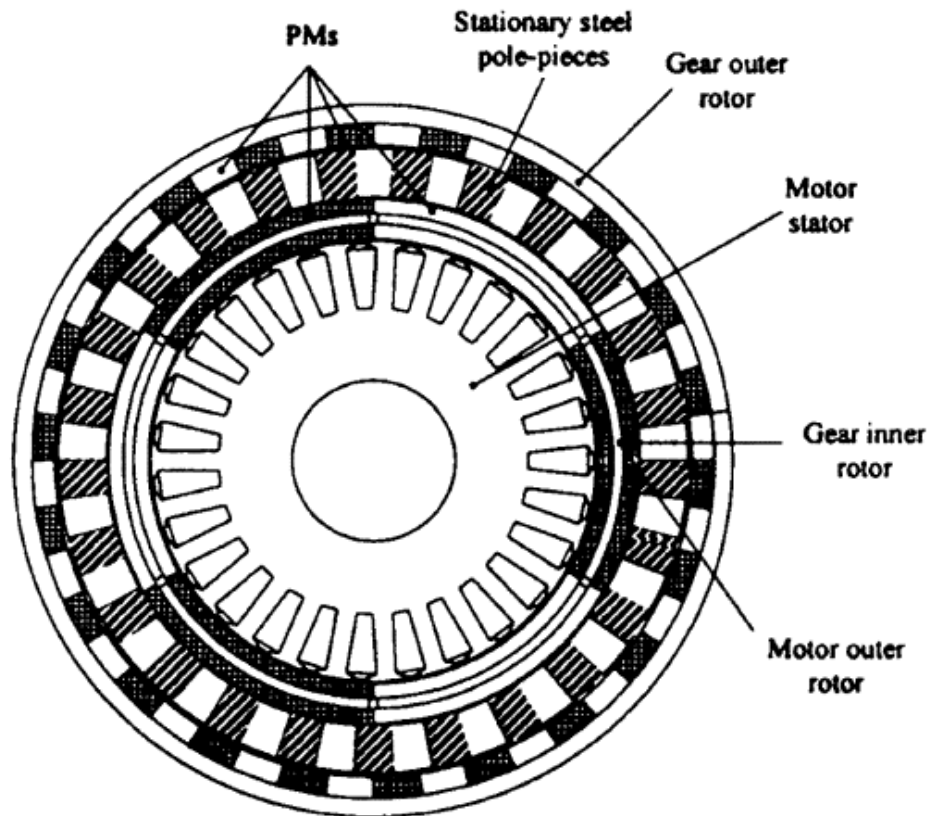


Figure I. 17 Machine à engrenages magnétiques (avec stator interne) [CZZ7]

En 2008, deux autres articles [DJ8, JJ8] ont été écrits sur le processus de conception décrit ci-dessus. Jian et ses collaborateurs. [JJ8] ont construit un prototype de 500 W de la machine proposée. Les caractéristiques statiques et dynamiques du moteur ont été étudiées par la méthode des éléments finis et par Matlab / Simulink. Les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux ont tous deux vérifié la validité du moteur proposé.

En 2009, Jian et ses collaborateurs [JJ9] ont proposé la même configuration pour une utilisation dans des applications d'éoliennes. Le système combiné était idéal pour la production d'énergie éolienne. La machine proposée a ensuite été comparée à une machine à entraînement direct et à une machine sans balais à engrenages planétaires avec des caractéristiques électriques identiques. La topologie proposée était de plus petite taille et d'un poids plus léger que les deux machines, avec un coût de matériau inférieur à celui de la machine à entraînement direct.

Hafla et ses collaborateurs en 2007 a écrit un article [HR7] sur l'analyse de conception efficace d'un engrenage magnétique coaxial sur un ordinateur haut performance. L'accent de cet article était mis sur une analyse efficace d'un engrenage magnétique avec une méthode d'équation intégrale. Pour une analyse précise d'un engrenage magnétique coaxial, une analyse tridimensionnelle non linéaire était nécessaire. L'analyse a nécessité le maillage de tous les

composants, y compris les petits entrefers. En utilisant une technique de compression matricielle rapide et efficace et la parallélisation, le maillage des entrefers est devenu inutile, ce qui a entraîné aux résultats précis avec des coûts de calcul acceptables. Dans l'article il y avait une description de l'analyse numérique complète d'un engrenage magnétique, y compris les effets de saturation et la structure tridimensionnelle avec une méthode d'équation intégrale et comment elle pouvait être mise en œuvre parallèlement, ce qui était nécessaire pour l'utilisation efficace des ordinateurs modernes.

En 2008, Wang et ses collaborateurs [WSW8] ont proposé une version simplifiée de la conception de Chau [CZZ7] de 2007. La machine proposée n'avait pas de rotor interne (voir Figure I.18). La machine a été appelée une machine à aimants permanents à flux modulé. La machine fonctionnait de la même manière qu'un engrenage magnétique coaxial, mais le champ tournant à grande vitesse était produit avec une armature plutôt que par des aimants. En 2009, il a écrit un article similaire, [WSH9]. Dans cet article, ils ont décrit la topologie et son principe de fonctionnement. Certaines techniques ont été employées pour optimiser et améliorer la performance du moteur, tandis que la validité des techniques proposées a été vérifiée avec l'analyse par éléments finis. De plus, une condition de fonctionnement alternative a été proposée et analysée. C'était là que le rotor extérieur était stationnaire et que le modulateur de flux était tourné. Le principe de fonctionnement proposé diminue encore la vitesse du moteur tout en augmentant le couple de sortie.

En 2008, il a écrit deux autres articles sur les PSEUDO-lecteurs, [ACH8, ARH8]. Dans les deux articles, le principe de fonctionnement des machines sans balais à entraînement magnétique a été décrit. Dans les deux articles, il a été conclu que les machines pouvaient atteindre des densités de couple excessives de 60 kNm / m<sup>3</sup> et que les machines avaient un facteur de puissance de 0,9 ou plus.

Reinap et Marquez ont publié un article [RM8] axé sur la conception d'un engrenage magnétique linéaire. L'objectif principal du projet était d'acquérir des compétences d'analyse ainsi que l'expérience pratique de la conception électromagnétique pour l'enseignement de l'ingénierie électrique. Dans le document, l'ensemble du processus de conception a été décrit et un exemple a été donné, ce qui le rend idéal pour un étudiant ayant une expérience minimale dans les engrenages magnétiques et la conception électromagnétique.

Davey et ses collaborateurs a écrit un article général [DW8] sur les engrenages magnétiques en 2008. Le papier a décrit les boîtes de vitesse magnétiques dominantes et s'est concentré sur

les engrenages magnétiques harmoniques. Jong et ses collaborateurs ont réarrangé l'engrenage magnétique coaxial dans son papier, [YJKY8], de 2008. L'engrenage proposé avait les mêmes composants qu'un engrenage magnétique coaxial, sauf que les deux rotors étaient internes (voir Figure I.19). La configuration proposée réduit le diamètre externe de l'engrenage et simplifie la conception mécanique. La mise en place des arbres et des paliers de support doit être soigneusement étudiée, afin de ne pas provoquer de pertes par courants de Foucault indésirables. Le document comprenait une procédure de dimensionnement intéressante où l'influence des différentes tailles de pièces a été comparée afin de déterminer une conception optimale. La configuration pourrait être idéale dans les applications où la mise en page est souhaitable.

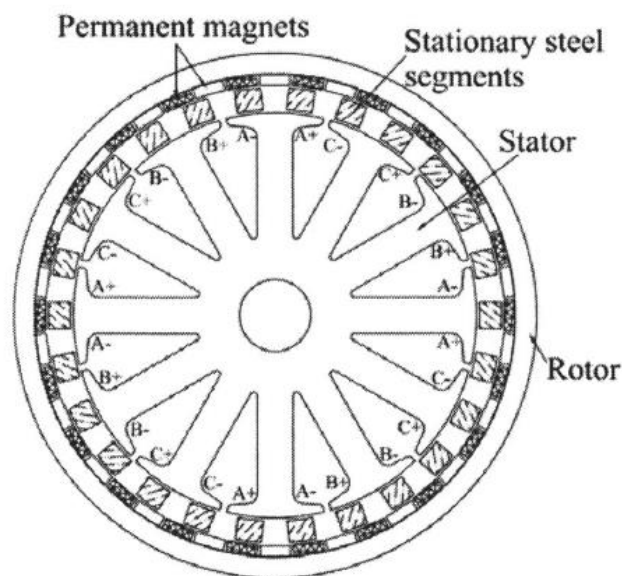


Figure I. 19 Machine sans balais à engrenages magnétiques (sans rotor intérieur)  
[WSW8]

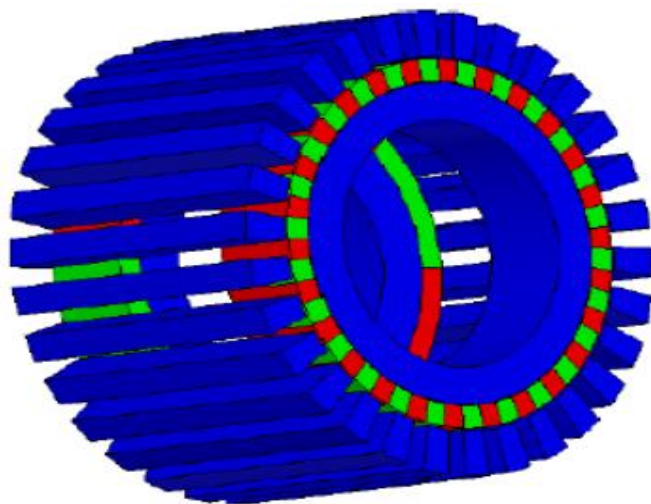


Figure I. 18 Rotors internes haute et basse vitesse [YJKY8]

En 2009, Jian et ses collaborateurs a écrit un article, [JC9], dans lequel une nouvelle approche analytique a été proposée pour calculer la distribution du champ magnétique dans les engrenages magnétiques coaxiaux. Un ensemble d'équations différentielles partielles en termes de potentiel magnétique scalaire a été utilisé pour décrire le comportement du champ, et la solution a été déterminée en considérant les contraintes de limites. La précision de l'approche proposée a été vérifiée en comparant les résultats de la distribution sur le terrain avec ceux obtenus à partir de la méthode des éléments finis.

L'engrenage harmonique était encore compliqué par la nécessité d'un ensemble de rotor à faible vitesse à aimants permanents flexible. Une façon de simplifier la conception et de la rendre plus pratique consistait à utiliser un rotor rigide à basse vitesse entraîné de façon excentrique par le rotor à grande vitesse de sorte qu'une seule variation cyclique de l'entrefer se produise entre les aimants permanents sur le rotor à basse vitesse et le stator (voir Figure I.15). Cette version était bien meilleure que la version flexible (comme on peut le voir en I.14B) mais pas sans complexités.

Liu et ses collaborateurs a écrit un article, [LCY9], sur l'engrenage magnétique coaxial en 2009. Dans le document, une nouvelle topologie où les AP ont été enterrés dans le noyau de fer du rotor externe a été décrite. Plutôt que d'incorporer les AP de polarité traditionnelle dans le noyau de fer du rotor externe (comme le montre la Figure I.20a), la configuration proposée insérait les AP avec la même polarité dans le noyau de fer (comme le montre la Figure I.20b). Le flux des AP a coulé dans les ponts de noyau de manière équivalente des pôles étrangers, créant ainsi un champ magnétique distribué avec le même nombre de paires de pôles. Cela a amélioré l'intégrité mécanique et le matériau à AP a pu être économisé pendant que la densité de couple était maintenue. La configuration proposée a réduit le matériau magnétique de 16,5% tout en diminuant le couple de décrochage de seulement 5,3% pour la construction du prototype.

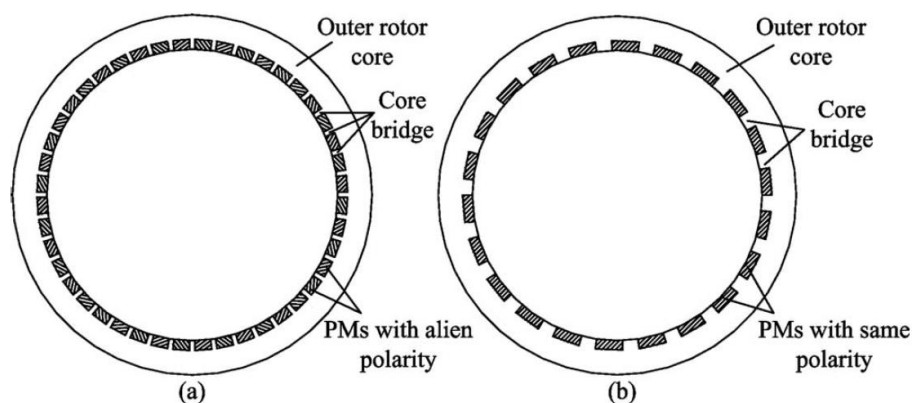


Figure I. 20 Configurations du rotor AP intérieur. a) Traditionnelle. b) Proposé [LCY9]

Frank et ses collaborateurs a écrit deux articles en 2009, [FT9, FT9\*], dans lesquels différentes applications d'engrenages magnétiques coaxiaux ont été décrites. Dans le premier, l'utilisation d'engrenages magnétiques coaxiaux pour la propulsion des navires a été discutée et, dans la prochaine, l'énergie éolienne. Dans les deux articles, la performance de l'engrenage, en particulier le couple de crantage à différents rapports d'engrenage a été décrite.

En 2009, Rasmussen et ses collaborateurs a publié un article, [RJM9], sur un engrenage magnétique intégré au moteur similaire à celui de [CZZ7]. Dans les conceptions intégrées précédentes, les enroulements d'extrémité des stators n'étaient pas pris en compte dans le calcul du couple densité. Dans la conception proposée, le moteur et l'engrenage ont été soigneusement conçus de sorte que les enroulements d'extrémité n'occupent pas d'espace supplémentaire. Dans le document, un processus d'échelle a été décrit afin de déterminer un engrenage optimisé avec le moins de matériel et de coût. La machine proposée avait une densité de couple maximale de  $130 \text{ KNm/m}^3$ .

Fu et ses collaborateurs. (2010), [FH10], ont comparé les performances d'une machine de production de particules modulée en flux avec une machine de production de particules magnétiques, une machine de production de particules traditionnelle et une machine de production de particules fractionnée utilisant le champ magnétique. Lors de la comparaison des quatre machines, il était nécessaire de s'assurer que tous les moteurs avaient le même rayon extérieur et la même longueur axiale. Les moteurs avaient la même quantité et le même type de matériaux magnétiques et la même qualité de matériaux de cuivre et de fer. Les moteurs ont également eu la même augmentation de température à pleine charge. Il a été conclu que le moteur à engrenages magnétiques produisait un couple très important à basse vitesse. L'inconvénient était que la machine avait trop de pièces en rotation. Comparée aux machines conventionnelles, la machine FM avait une densité de couple similaire. Cependant, la machine FM avait un plus petit nombre de fentes et la ventilation était meilleure en raison des écarts entre la modulation pièces. Le moteur à AP conventionnel avait trop de fentes, sa zone de fente ne pouvait pas être utilisée efficacement, les enroulements d'extrémité étaient trop longs et il avait également un très grand couple de crantage. Le moteur multipolaire à fentes fractionnées comportait un petit nombre de fentes et des enroulements d'extrémité courts. Son couple de sortie était plus petit que celui des moteurs conventionnels et il avait un petit couple de crantage.

Dans la référence [PFT13] qui a été publiée en février 2013, les auteurs introduisent le concept de l'engrenage magnétique Trans-rotatif (qu'ils appellent TROMAG). Le TROMAG (voir Figure I.21) est un dispositif magnétique constitué d'un rotor et d'un traducteur avec un

entrefer, capable de convertir le mouvement linéaire en rotation, et vice versa, et faire l'action d'engrenage en même temps.

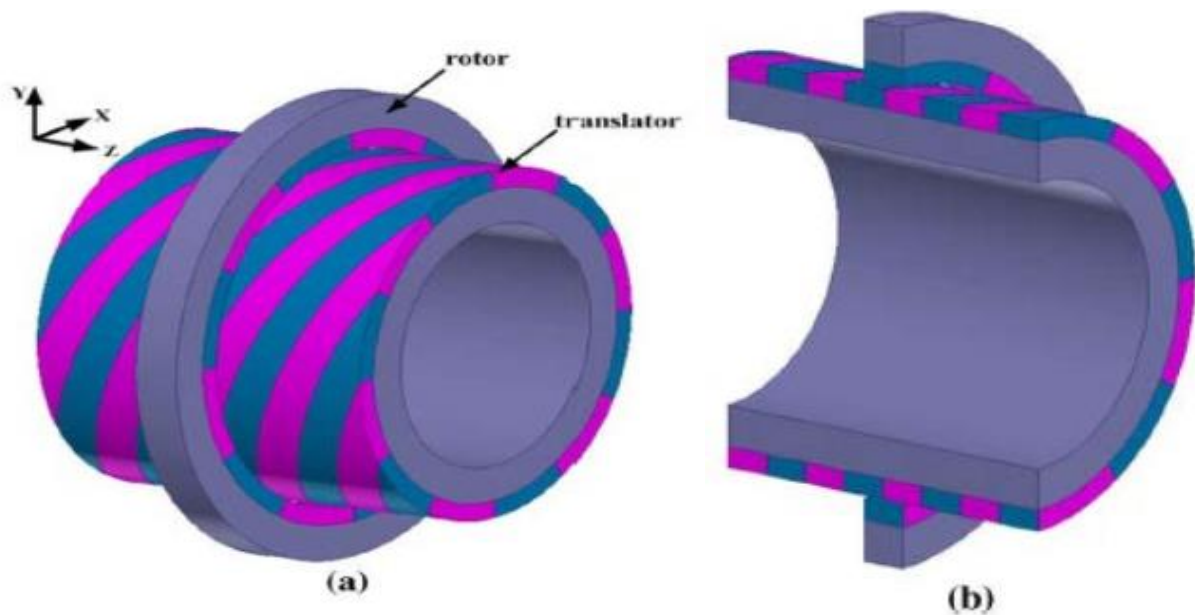


Figure I. 21 (a) vue en 3D et (b) vue en coupe d'un TROMAG à 12 pôles [PFT13]

La référence [LCJ11] propose une machine à aimant permanent linéaire (AP) pour la collecte d'énergie des vagues à entraînement direct en utilisant un engrenage magnétique linéaire. La machine proposée consiste en un engrenage magnétique linéaire en cascade avec un générateur linéaire d'AP dans lequel le moteur à grande vitesse de l'engrenage magnétique linéaire et le traducteur du générateur d'AP partage astucieusement avec le même arbre. Le mouvement d'onde alternatif lent est directement capturé par le moteur à faible vitesse de l'engrenage, puis amplifié en vitesse par l'intermédiaire de l'engrenage pour actionner le générateur, produisant ainsi une tension de sortie plus élevée. En 2013 et 2014, Jonathan Z. Bird a écrit des articles [ABC13- BBVA14] sur les engrenages magnétiques coaxiaux utilisant des aimants en ferrite.

Dans [PFH14], l'auteur présente un nouvel engrenage magnétique (EM) à flux hybride triple-permanent-aimant-excité (TPME) qui intègre un flux transverse EM et un EM à flux axial dans une seule unité. Par rapport à ses homologues classiques, l'EM proposée transmet une densité de couple relativement élevée. Comparée au flux transverse EM, cette nouvelle structure utilise une nouvelle configuration sur le rotor à grande vitesse, un segment de fer supplémentaire entre le rotor à basse vitesse et le rotor à grande vitesse pour moduler le champ magnétique et ainsi contribuer à la transmission. De couple de sortie supplémentaire. Il emploie également des

aimants permanents sur les segments de fer pour produire couple additionnel. L'EM à flux hybride TPME proposée peut offrir une capacité de transmission de couple beaucoup plus élevée que ses équivalents conventionnels, ce qui la rend plus compétitive pour les applications à couple élevé à faible vitesse.

La référence [CCLL14] présente une étude comparative entre l'engrenage magnétique coaxial à base de particules de non-terres rares et de terres rares utilisant l'analyse par éléments finis. Les performances électromagnétiques de quatre engrenages magnétiques coaxiaux, installés avec des particules non rares ou des terres rares, sont analysées et comparées la même structure. Dans cet article, la rentabilité des engrenages magnétiques coaxiaux adoptant différents types d'AP est évaluée. Les résultats montrent que les particules non-terres rares, en particulier l'aluminium-nickel-cobalt, sont préférées pour l'application aux engrenages magnétiques coaxiaux en mettant l'accent sur la rentabilité.

En 2014, Yiduan Chen [CNLHL14] discute des performances de trois types d'engrenages magnétiques (EM), à savoir les EM à flux radial, les EM à flux transverse et les EM à flux axial, qui sont analysés et comparés quantitativement. Pour comparer équitablement la capacité de couple de différentes topologies d'EM, tous les EM étudiées ont le même rapport de démultiplication, le même diamètre extérieur et la même longueur de pile axiale. Pour maximiser la densité de couple, plusieurs paramètres de structure importants sont optimisés. Scénarios utilisant différents matériaux de noyau de fer et différentes directions de magnétisation les aimants sont également étudiés. Sur la base de l'analyse comparative, des topologies appropriées d'EM pouvant atteindre une densité de couple allant jusqu'à 198 kNm/m<sup>3</sup> sont suggérées.

La référence [LMR13] décrit un modèle analytique bidimensionnel (2D) pour prédire la distribution du champ magnétique dans les engrenages magnétiques à champ axial en utilisant la méthode du sous-domaine. La méthode des sous-domaines consiste à résoudre les équations aux dérivées partielles liées aux équations de Maxwell dans chaque région rectangulaire (aimants, entrefers et fentes) par la méthode de séparation des variables.

De la section historique, il peut être observé que les engrenages magnétiques sont très polyvalents, les EM peuvent être configurés dans n'importe quel arrangement que les engrenages mécaniques traditionnels peuvent être configurés. Cependant, les EM offrent des avantages significatifs par rapport aux engrenages mécaniques traditionnels. Typiquement, les engrenages mécaniques transfèrent le couple avec seulement une à trois dents d'engrenage à un



instant donné, où l'EM peut transférer le couple avec tous ses aimants permanents à un instant donné. Ainsi, EM peut occuper un plus petit volume et transférer encore la même quantité d'énergie par rapport aux engrenages mécaniques.

### I.3 DEFINITION D'UN COUPLAGE MAGNETIQUE

Un couplage magnétique est un couplage qui transfère le couple d'un arbre, mais en utilisant un champ magnétique plutôt qu'une connexion physique mécanique.

Les accouplements à arbre magnétique sont le plus souvent utilisés pour les pompes à liquide et les systèmes d'hélices, car une barrière physique statique peut être placée entre les deux arbres pour séparer le fluide du moteur fonctionnant dans l'air. Les accouplements à arbre magnétique empêchent l'utilisation de joints d'étanchéité d'arbre, qui finissent par s'user et à ne pas pouvoir glisser entre deux surfaces l'une contre l'autre. Les accouplements magnétiques sont également utilisés pour faciliter la maintenance des systèmes qui nécessitent généralement un alignement de précision, lorsque des accouplements d'arbres physiques sont utilisés, car ils permettent une plus grande erreur d'axe entre le moteur et l'arbre mené. [WIKI1]

### I.4 LES DIFFERENTS TYPES DE COUPLAGE MAGNETIQUES

Selon la distribution du champ magnétique, les accouplements magnétiques classiques peuvent être à flux radial ou à flux axial.

**I.4.1 Les accouplements à flux radial** : sont de type coaxial ou concentrique. Dans ce cas Les deux rotors sont disposés l'un à l'intérieur de l'autre d'une façon concentrique (Figure I.22.b). Le champ transmis du rotor entraînant au rotor entraîné est principalement radial.

**I.4.2 Les accouplements à flux axial** : sont aussi dits de type (disque). Dans cette configuration, les deux rotors sont disposés l'un en face de l'autre et le champ transmis entre les deux rotors est axial (Figure I.22.a).



Figure I. 22 Accouplements magnétiques (aimant-aimant) : (a) à flux axial et (b) à flux radial fabriqués par [DEX]

Dans les deux cas (coaxial ou disque), un des deux rotors, au moins, est composé d'une rangée d'aimants permanents collés sur une culasse ferromagnétique. En fonction des applications, le matériau du deuxième rotor peut être identique au premier rotor comme il peut être à base de matériaux électriquement conducteurs ou à hystérésis.

### I.4.3 Les configurations du rotor entraîné

Selon les matériaux utilisés, on retrouve le plus souvent trois configurations pour le rotor entraîné :

**a) Synchrones à aimants :** Les deux rotors sont constitués de rangées d'aimants (Figure I.22). Pour la topologie à flux axial, les aimants sont aimantés axialement [Lub12]. Concernant la topologie à flux radial, l'aimantation peut être radiale [FON09], tangentielle ou mixte [CHA99B]. Les accouplements à aimants montés en surface à aimantation radiale sont les plus répandus dans différentes configurations d'aimantation sont également effectués par beaucoup de chercheurs. Lors du fonctionnement de l'accouplement, les deux rotors se suivent tant que le couple de décrochage n'est pas atteint. Au-delà de ce couple, l'accouplement décroche et ne transmet plus le couple. Ce type d'accouplement peut donc servir comme protection en cas de surcharge mécanique.

**b) Asynchrone ou à induction :** Dans ce type d'accouplement, le rotor entraîné est composé d'une pièce massive réalisée avec un matériau électriquement conducteur (aluminium ou cuivre). Cette pièce est une Couronne pour l'accouplement à flux radial et un disque pour celui à flux axial (Figure I.23). Le couplage dans ce cas est dit asynchrone. Lorsque les rotors entraînant (à aimants) et entraîné (conducteur) tournent à des vitesses différentes, des courants sont induits dans la pièce conductrice. L'interaction de ces courants avec le champ magnétique donne le couple électromagnétique. Les forces résultantes sont fortement liées à la différence de vitesse entre les deux rotors (glissement) [Smi01]. Ce type d'accouplement, dans sa configuration axiale, est très utilisé pour des applications qui nécessitent une vitesse variable (pompes, ventilateurs). Pour cela, il suffit de varier l'entrefer.

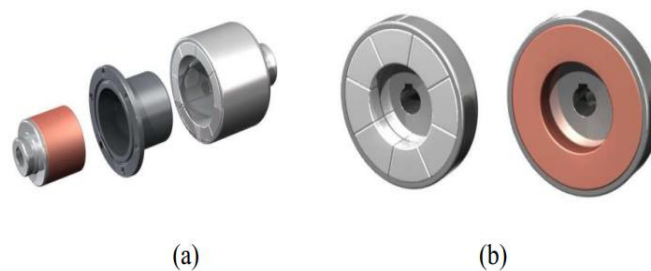


Figure I. 23 Accouplements magnétiques à induction : (a) à flux radial et (b) à flux axial [Dex]

c) **A hystérésis** : Dans ce cas, le rotor à aimants entraîne un deuxième rotor en matériau dit « à hystérésis ». Le cycle d'hystérésis est à l'origine d'un décalage entre la polarisation magnétique du matériau et le champ des aimants ce qui engendre le couple électromagnétique [CAN08]. Ce dernier reste sensiblement fixe ce qui rend ce type d'accouplements intéressant pour des applications qui nécessitent un couple constant. Ils peuvent aussi servir à limiter la transmission du mouvement en cas de surcharge (limiteurs de couple).

## I.5 LES APPLICATIONS DES ENGRENAGES MAGNETIQUE DANS LE DOMAINE INDUSTRIEL

De par les nombreux avantages que nous offres les accouplements magnétiques on les retrouvera un peu partout dans les applications industrielles tel que les secteurs de : énergies renouvelables ; maritime ; pétrochimiques... etc. comme montrez dans les exemples suivants :

### I.5.1 Les éoliennes

Le but sera de changer les accouplements mécaniques actuellement utiliser dans les éoliennes par les accouplements magnétiques fait partie des objectifs des industriels. A l'instar de l'étude proposée par [OJS12] ce travail a été supervise par ERDF sous l'intitule « Wind and Hydrogène Based Autonomous Energy Suply System » avec le but de trouver les paramètres de construction de cet accouplement afin de transmettre un couple de 250Nm qui est le couple nominal du générateur synchrone a aimant permanent utilise. Cet accouplement est à flux radial à base d'aimant NdFeB de longueur axiale de 185 mm et de diamètre externe de 121.7 mm.

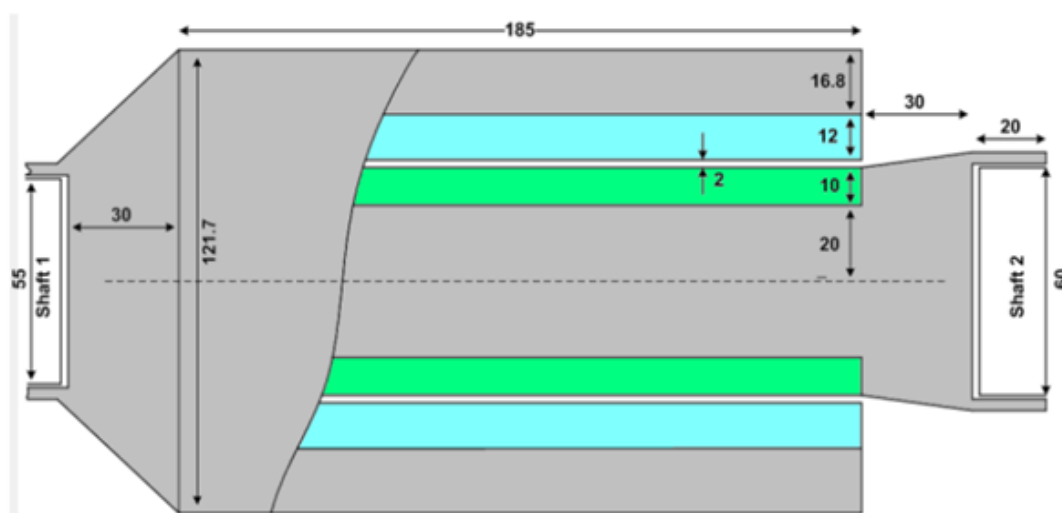


Figure I. 24 Couplage magnétique pour une utilisation dans les centrales éoliennes (Les paramètres de conception sont identiques pour la 21ème variante: Gris - acier 3, vert – aimant permanent sur demi-accouplement interne, bleu – aimant permanent sur demi- accouplement externe)

## I.5.2 Les véhicules Hybrides

Avec la diminution de la réserve d'énergies fossiles le monde est passée aux véhicules électriques mais toujours en utilisant les accouplements mécaniques comme pour les voitures à traction qui sont les plus accessibles donc qui ouvre a plus de possibilité de recherches. Parmi les possibilités qui s'offrent à nous pour la transmission du mouvement on a :

### 1. Transmoteur

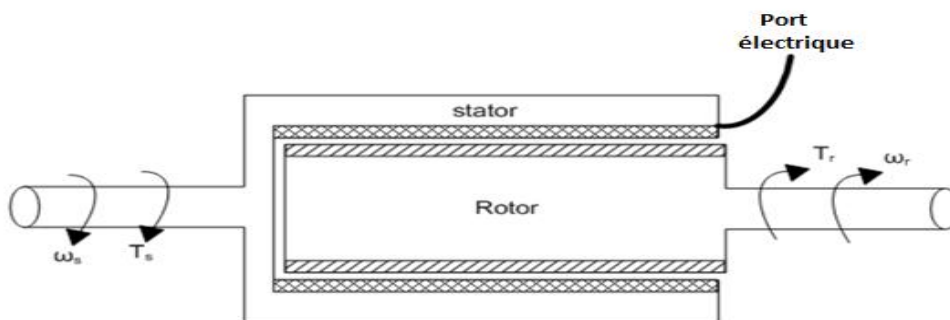


Figure I. 25 Transmoteur

Le transmoteur est une machine électrique compose d'un stator relié au moteur et d'un rotor relié à l'arbre de transmission, Le stator reçoit la vitesse du moteur et il possède lui-même un port électrique, donc quand on envoie un courant au stator ça va engendrer une variation des FEM induite qui va être capté par le rotor a aimants permanents donc le rotor va suivre le champ statorique tournant.

Une des premières études de cette machine se trouve dans [S94]. L'étude a été menée pour trouver des trains de véhicules électriques hybrides (VEH) qui pourraient bénéficier de nouveaux types d'engrenages. Le transmoteur, présenté comme un engin électromagnétique, a été étudié en regardant tous les différents modes de fonctionnement. Neuf modes de fonctionnement distincts ont été trouvés, représentant des cas où le stator et le rotor étaient soit libres de se déplacer ou bloqués dans une position. La puissance au port électrique a été trouvée par une sommation de vitesse dans (I.01). Le couple de la machine a été trouvé pour être juste un couplage 1: 1, comme le montre (I.02)

$$P_{elec} = T_r(\omega_r + \omega_s) \quad (I.01)$$

$$|T_r| = |T_s| \quad (I.02)$$

Comme indiqué précédemment, chacun des neuf modes de fonctionnement distincts tombait dans l'une des quatre catégories de fonctionnement d'une machine électrique, sauf dans le cas où le rotor et le stator tournaient à la même vitesse, auquel cas la machine fonctionne simplement comme un verrouillage électromagnétique. On a supposé que la structure de la machine électrique est celle d'une machine à réluctance variable (MRV) ou d'une machine à courant continu (MCC) pour le mode de fonctionnement dans lequel le rotor est bloqué. Cependant, dans le cas où  $\omega_r = \omega_s$ , seul la MRV est capable de fonctionner dans ce mode en régime permanent.

Le rôle du moteur à combustion interne (MCI) est de générer de la puissance qui sera stockée dans les batteries. Cette énergie est utilisée afin d'alimenter la traction électrique du véhicule.

Le rôle du moteur à combustion interne (MCI) est de générer de la puissance qui sera stockée dans les batteries. Cette énergie est utilisée afin d'alimenter la traction électrique du véhicule.

Il existe un autre mode où le MCI et l'électrique peuvent se connecter en même temps à la boîte mécanique pour que leurs couples s'ajoutent.

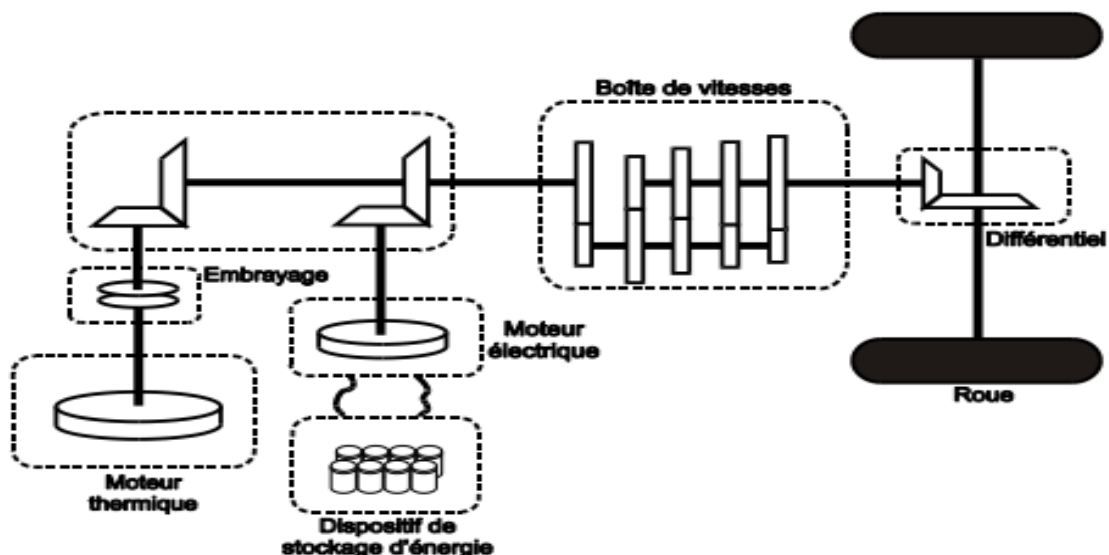


Figure I. 26 Eléments du VEH

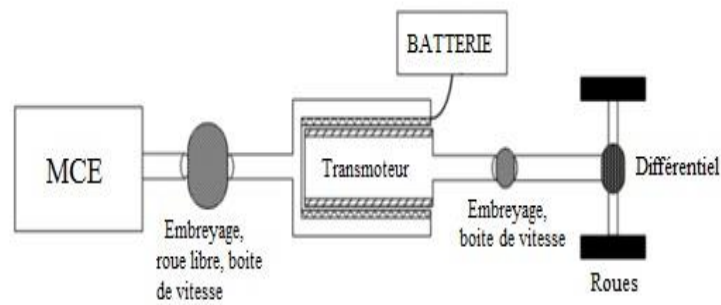


Figure I. 27 Train d'un VEH avec un transmoteur

## 2. Transmission magnétique

Parmi les innovations du 21<sup>ème</sup> siècle est d'accoupler une boîte magnétique à un véhicule, et parmi elles l'accouplement entre un véhicule électrique hybride (VEH) et une boîte magnétique.

L'idée de cet accouplement est similaire aux systèmes déjà proposés avant. Ce système est composé des éléments électromécaniques connectés directement aux roues motrices, ou en passant par des éléments connectés en série vers les roues. D'après [IEEE07] [IEEE08] [ICEMS08] les dimensionnements de ce genre d'accouplement sont identiques à une MSAP à prendre en considération avec le véhicule lui-même. La boîte de vitesses électromécaniques ne dépend pas des autres éléments de telle sorte qu'on pourrait la placer à l'intérieur de la roue elle-même. Ce genre de montage est représenté dans la figure I.28.a où le rotor externe est relié directement à l'axe de la roue. La figure I.28.b montre la possibilité de connecter l'engrenage magnétique à l'intérieur de l'arbre de transmission avant d'arriver au différentiel.

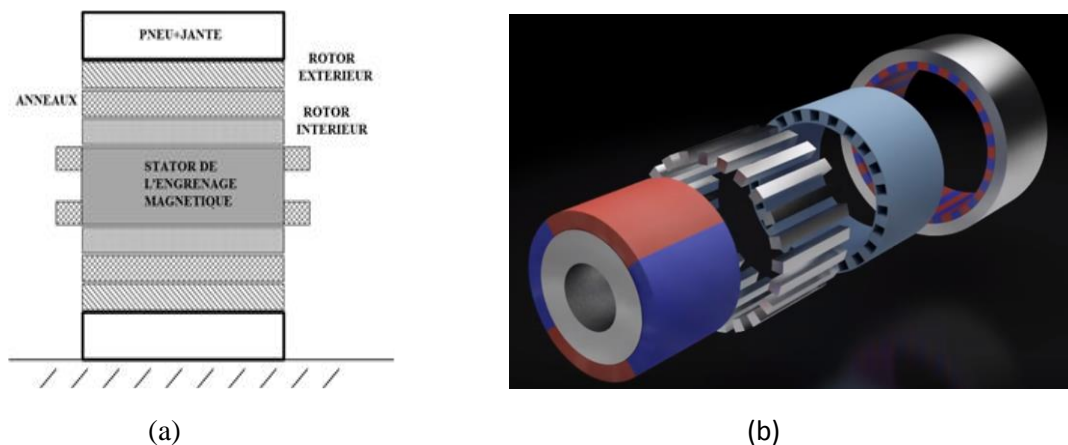


Figure I. 28 Engrenage magnétique (a)engrenage dans l'axe de la roue (b) ensembles des éléments fondamentaux

## **I.5.3 Train à Lévitiation Magnétique**

### **I.5.3.1 le Maglev**

Le Maglev (en anglais Magnetic levitation train) est un train expérimental qui est testé au Japon depuis 1990. Une ligne de 19 Km a été construite à Yamanashi pour ces tests. Depuis le 3 avril 1997, des essais sont régulièrement pratiqués et le 14 avril 1999, le Maglev a atteint une vitesse de 552 Km/h et qui atteint actuellement les 603Km/h.

#### **I.5.3.1.1 principe de fonctionnement**

Le champ magnétique de la terre est de  $4 \cdot 10^{-5}$  Tesla, celui d'un aimant est entre  $10^{-2}$  et  $10^{-1}$  Tesla. Pour faire léviter un train, il faut environ 4.2 Tesla. Il faut donc un champ magnétique très puissant pour permettre la lévitation d'un train. On a recours aux supraconducteurs.

Il y a deux sortes de supraconducteurs, le type 1 et le type 2. Les supra conducteurs de type 1 ne peuvent fournir un champ magnétique suffisamment puissant pour la lévitation d'un train. Le supraconducteur de type 1 qui produit le champ magnétique le plus puissant est le niobium. En effet, son champ magnétique peut aller jusqu' à 0.14 Tesla. Les supraconducteurs de type 2 ont une température critique bien plus élevée que les supraconducteurs de type 1, ce qui leur permet de produire un champ magnétique bien plus puissant (environ 23 Tesla pour l'alliage niobium-étain (Nb<sub>3</sub>Sn)).

#### **I.5.3.1.2 fonctionnement de la lévitation**

Le Maglev circule sur une voie en forme de « U » équipée de bobines qui servent à la lévitation. Ces bobines sont situées sur les voies et sont traversées par un courant électrique, tandis que des aimants sont placés entre les wagons du train. Ces aimants sont refroidis à  $-269^{\circ}$  C dans des réservoirs remplis d'hélium liquide. Cela crée un champ magnétique d'environ 4,23 Tesla qui permet de soulever le train.

#### **I.5.3.1.3 Principe de propulsion**

Le système de propulsion est constitué d'aimants situés sur les côtés du train et d'enroulements de propulsion placés dans les parois entourant les voies de guidage. Ces enroulements sont traversés par un courant alternatif triphasé permettant de créer un champ magnétique de décalage. Les aimants placés sur le train sont alors repoussés et attirés en même temps, permettant ainsi au Maglev d'avancer.

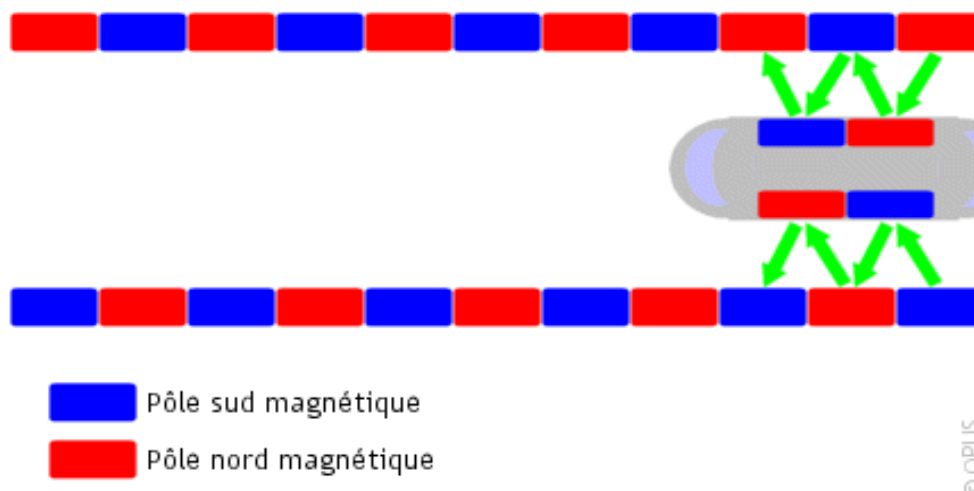


Figure I. 29 Système de propulsion du Maglev

Le Maglev représente le transport ferroviaire du futur, mais le fait qu'il soit trop cher à construire et à entretenir fait que les chances de le voir implanté partout dans le monde sont très faibles mais pas impossible. [TR]

### I.5.3.2 Le Transrapid

Les trains à lévitations magnétiques représentent une avancée considérable dans le domaine du transport terrestre. En effet, comme ces trains sont en lévitation, les frottements entre les roues et les rails sont inexistantes. Cela permet aux trains d'atteindre une vitesse maximale d'environ 550 Km/h.

Le Transrapid est un projet allemand visant à relier l'aéroport de Munich à la ville grâce à un train à lévitation magnétique. Le seul Transrapid existant et fonctionnel se situe maintenant en Chine à Shanghai. Il est en service depuis 2002 et permet de relier l'aéroport et la ville. La ligne devait être plus longue, mais suite aux protestations des riverains, qui craignaient des nuisances dues à d'éventuelles radiations magnétiques.

#### I.5.3.2.1 Principe de lévitation et de guidage en translation

La lévitation du Transrapid est permise par des électro-aimants placés sous le train et ils vont alors interagir avec des barres de fer laminées qui sont placées dans un monorail en forme de T. Pour que le train puisse léviter, il faut que la force magnétique compense exactement la gravité. Grâce à cela, le train lévite à 1 centimètre du monorail. Comme on peut le voir sur la photo ci-dessous, le guidage en translation est permis par des électroaimants de guidages ainsi que des rails de guidages qui se repoussent mutuellement. Néanmoins ce type de propulsion est



instable, en effet, si la distance entre le stator et l'électro-aimant augmente alors la force magnétique diminue et le train risque de toucher le monorail. C'est le même problème pour les électro-aimants de guidage. Le guidage en translation est le même pour le Transrapid ainsi que le Maglev.

### I.5.3.2 Principe de propulsion

Son système de propulsion est un moteur linéaire à stator long synchrone qui génère des forces longitudinales. Ce moteur comprend des bobinages triphasés disposés sur la voie et des électro-aimants installés sur le véhicule. Pour faire varier la vitesse du train, il faut non seulement faire varier le courant alternatif qui passe dans les bobines, mais aussi ajuster la fréquence du courant alternatif pour permettre la variation des pôles Nord et Sud. Ce moyen de propulsion est donc très économe.

Un moteur linéaire synchrone à stator long est un moteur sans contact qui fournit une énergie magnétique et séparé en deux choses : les bobinages sur la voie et les solénoïdes sur le train. On "déplie" le moteur ce qui fait que le rotor est en translation au lieu d'en rotation. Et par conséquent, il crée un champ magnétique durant son déplacement qui fait avancer le train. La vitesse de celui-ci étant proportionnelle à la tension alimentant le moteur. En simplifiant on peut admettre que c'est aussi proportionnel à l'intensité du courant.

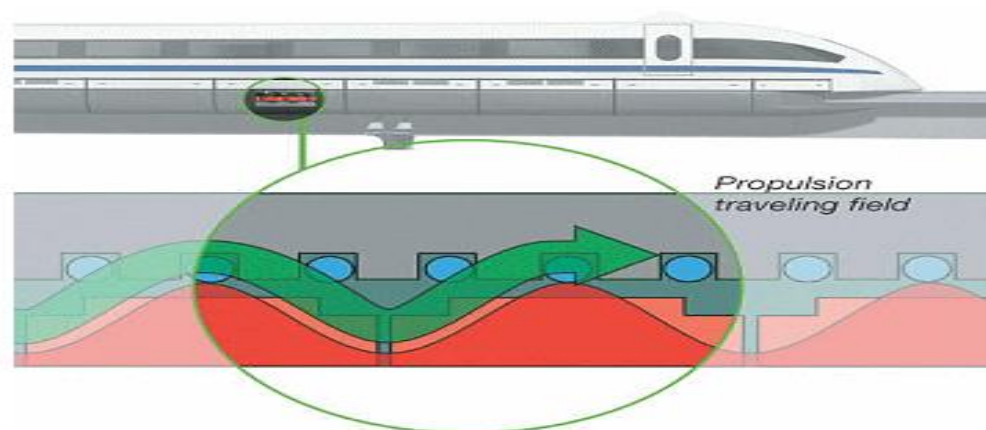


Figure I. 30 Système de propulsion du Transrapid

Le Maglev a les mêmes caractéristiques que le Transrapid, Leur différence réside dans leur moyen de lévitation, en effet la lévitation du Maglev est plus stable et n'a pas besoin d'être réglée aussi précisément que celle du Transrapid. Il consomme aussi quatre fois moins d'énergie qu'un avion et deux fois moins qu'une voiture, et bien sûr leur plus grand inconvénient reste le

cout de la construction et de l'entretien, Le prix de construction du Maglev est très élevé à cause de l'utilisation des supraconducteurs dans sa méthode de lévitation et que les réseaux ferroviaires modernes ne sont pas adaptés au Maglev, donc il faut aussi refaire toutes les voies. De plus, lorsque la vitesse du train passe en dessous des 100 Km/h, la lévitation devient alors impossible et le train doit alors rouler sur des pneus du même type que ceux des avions. [TR]

#### I.5.4 secteur de la marine

Le groupe KTR (fabricant allemand spécialisé dans la fabrication de transmissions de puissance) fabrique des accouplements magnétiques appelés MINEX®-S adaptés aux applications dans différents domaines (ex : construction navale, pétrochimie). Ils sont à flux radial à base de NdFeB et SmCo pour des températures de fonctionnement maximales allant de 150 à 300°C. Ces accouplements couvrent une gamme de couple allant de 0.15 à 1000 Nm et une vitesse allant jusqu'à 3600 tr/mn [KTR13]. Un exemple d'accouplement est montré sur la Figure I.31. Il est couplé à une pompe pour faciliter la circulation de l'huile dans un navire [KTR13].

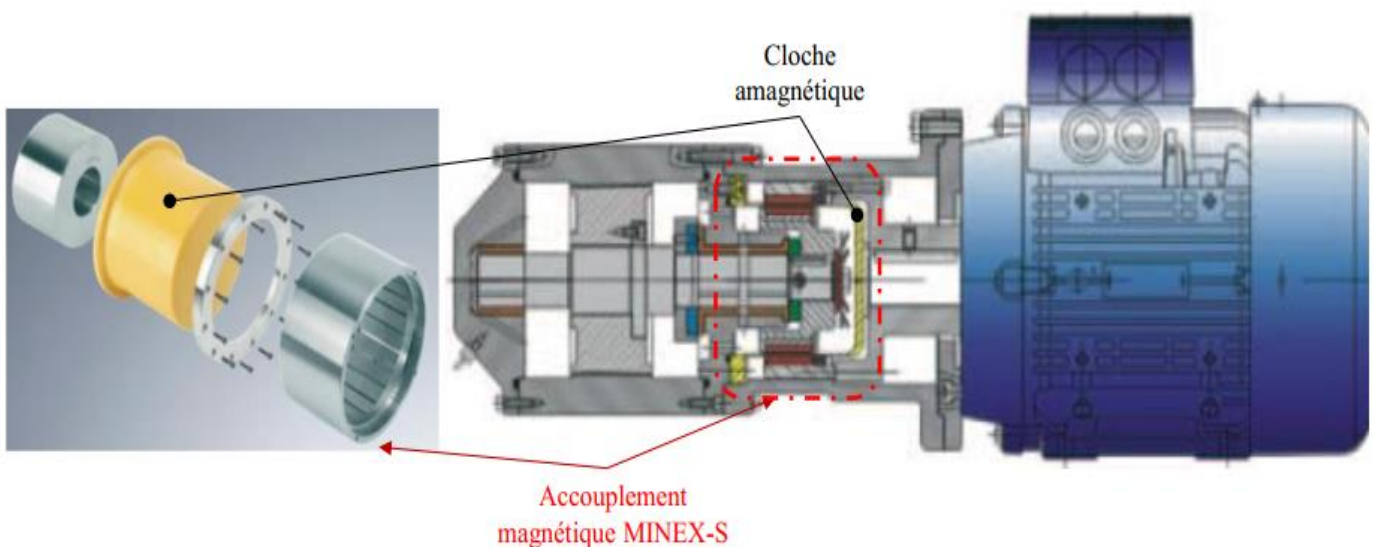


Figure I. 31 Accouplement magnétique MINEX®-S fabriqué par KTR couplé avec une pompe à circulation d'huile dans le secteur de la marine [KTR13]

### I.5.5 Secteur de la pétrochimie

Dans les raffineries de pétrole, les accouplements magnétiques sont combinés à des pompes. HERMETIC-Pump GmbH (fabricant allemand des pompes) développe des pompes à entraînement magnétique pour des applications à hautes températures (jusqu'à 320°C) avec une vitesse comprise entre 1450 et 3500 tr/mn. Depuis l'apparition de la loi fédérale allemande contre les émissions polluantes en 2002, ils fabriquent des pompes à entraînement magnétique pour assurer une parfaite étanchéité. Un exemple d'accouplement magnétique est montré sur la (Figure I.32) [HER]. Il est relié à un moteur extérieur classique pour entraîner l'arbre de la pompe sans contact. Les deux rotors de l'accouplement sont isolés entre deux milieux différents. Le rotor, relié à l'arbre de la pompe, est immergé dans le liquide de pompage et le deuxième est dans l'air ambiant. Le rotor, relié à l'arbre de la pompe, est immergé dans le liquide de pompage et le deuxième est dans l'air ambiant.

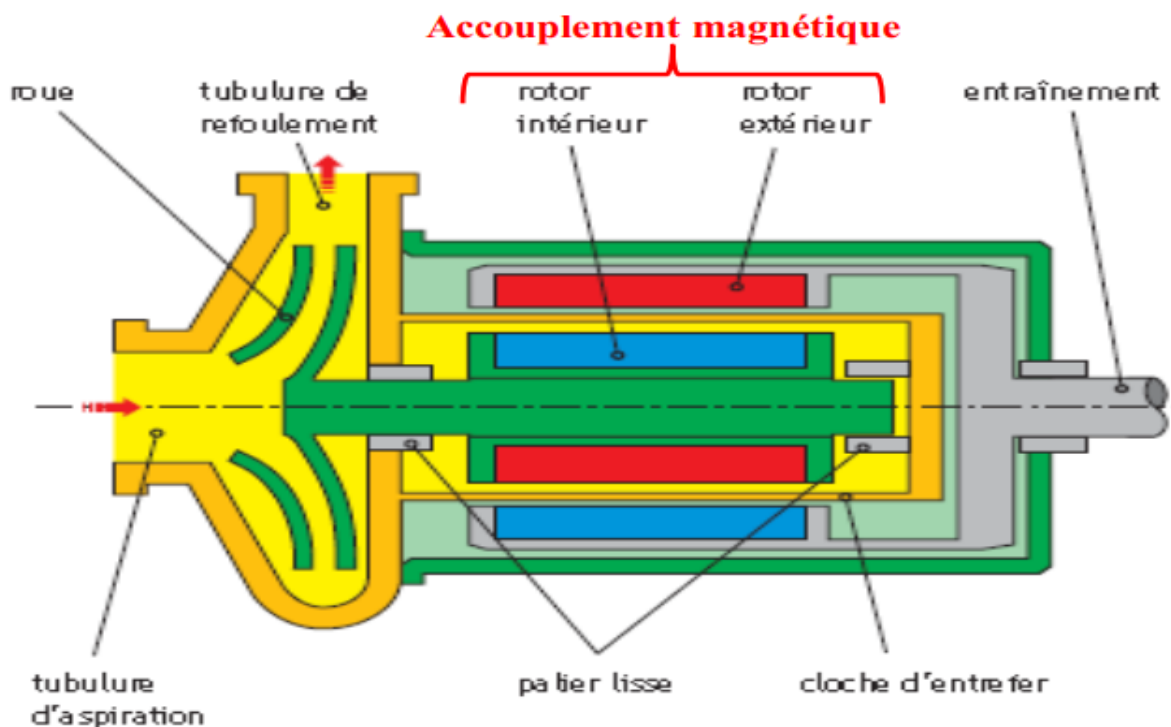


Figure I. 32 Pompe hermétique [HER]

## I.6 CONCLUSION

Les accouplements magnétiques comme tous les autres accouplements sont conçus pour transmettre le couple d'un arbre à un autre mais avec des avantages certains tel que l'étanchéité

lors de son utilisation dans les pompes ce qui évite les fuites de produits dangereux donc qui augmente le facteur sécurité, et aussi on constate que lors de surcharge sur l'accouplement il passe à une autre position et continu contrairement aux accouplements mécaniques qui eux casse directement ainsi qu'on peut aussi parler du fait qu'il n'y a pas de frottement, qui implique pas d'usure et pas d'échauffements, qui réduit alors les coûts de maintenance et qui augmente la fiabilité. Mais malheureusement il n'est pas parfait car pour commencer il est fait à base d'aimants permanents et les meilleurs sont fait de terres rares ainsi que le dimensionnement de la machine dépend d'eux, aussi les accouplements magnétiques ne peuvent généralement gérer que des charges de couple légères et des applications avec des démarrages progressifs ou une très faible inertie de rotation du côté entraîné du système.

Les accouplements magnétiques sont destinés à remplacer complètement les accouplements mécaniques mais il reste du travail à faire pour perfectionner la maîtrise des aimants permanents surtout dans le domaine des supraconducteurs qui représente l'avenir des machines électriques.

**CHAPITRE II**  
**ENGRENAGE MAGNETIQUE**  
**CONCENTRIQUE**

## II.1 INTRODUCTION

On reconnaît un engrenage magnétique concentrique (figure II.1) par ses deux rotors l'un à l'intérieur de l'autre, l'un des rotors est l'entraînant et l'autre c'est l'entraîné. Pour les engrenages qui entraînent un couple élevé, on met des barres en acier entre les deux rotors.

A noter que l'engrenage magnétique concentrique se fait à flux radial (les lignes de champs sont perpendiculaires à l'axe du système)

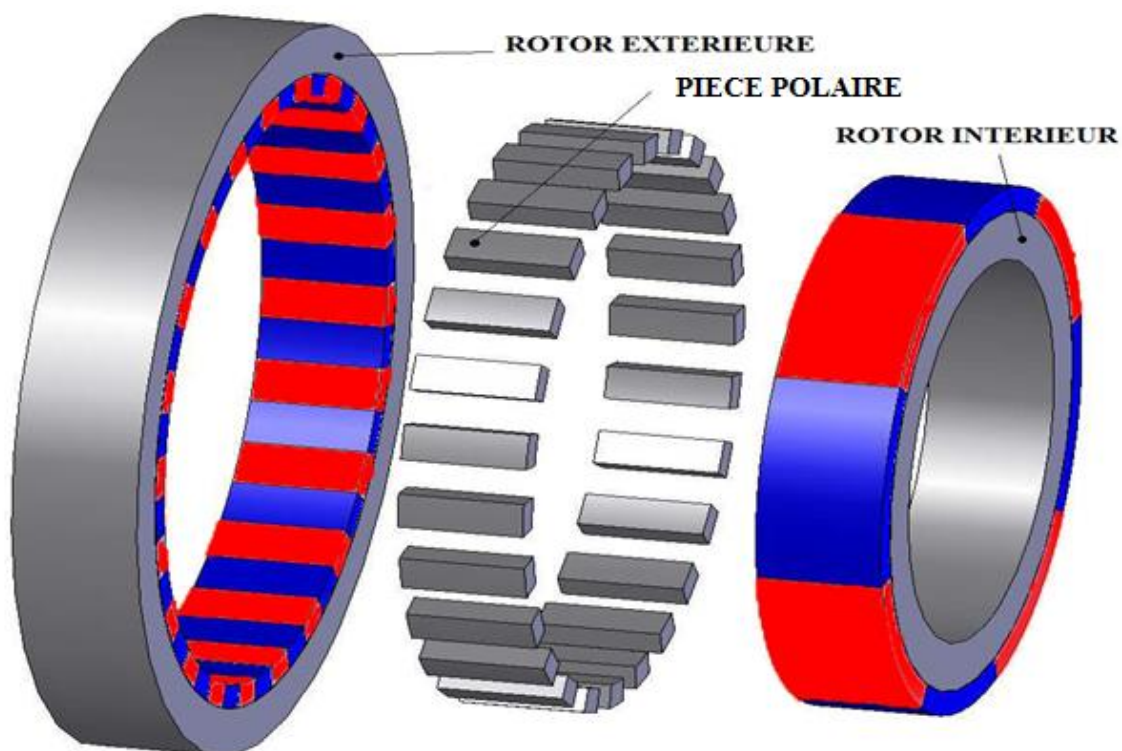


Figure II. 1 ENGRENAGE MAGNETIQUE CONCENTRIQUE

Ce genre d'accouplement magnétique convient à une large gamme d'applications parce qu'il possède plusieurs modes de fonctionnements

Ce type d'accouplement peut transmettre le mouvement à une vitesse

1. Réduite (Réducteur de vitesse)
2. Elevée (Multiplicateur de vitesse)
3. Constante

## II.2 PRESENTATION DU MODELE D'ETUDE

Notre étude va être basée sur l'exemple de [ATA01], parmi les avantages de ce type d'engrenage il possède plusieurs modes de fonctionnement.

Un engrenage magnétique concentrique est représenté sur la figure II.2<sub>2</sub> avec respectivement 17 et 4 paires de pôles aux rotors extérieure et intérieure. Dans toute variation de ce type d'engrenage magnétique, il y a deux rotors et un ensemble de pièce polaire (Barres ferromagnétiques) entre les rotors pour moduler le flux magnétique.

Les culasses des deux rotors et les pièces polaires sont des matériaux ferromagnétiques.

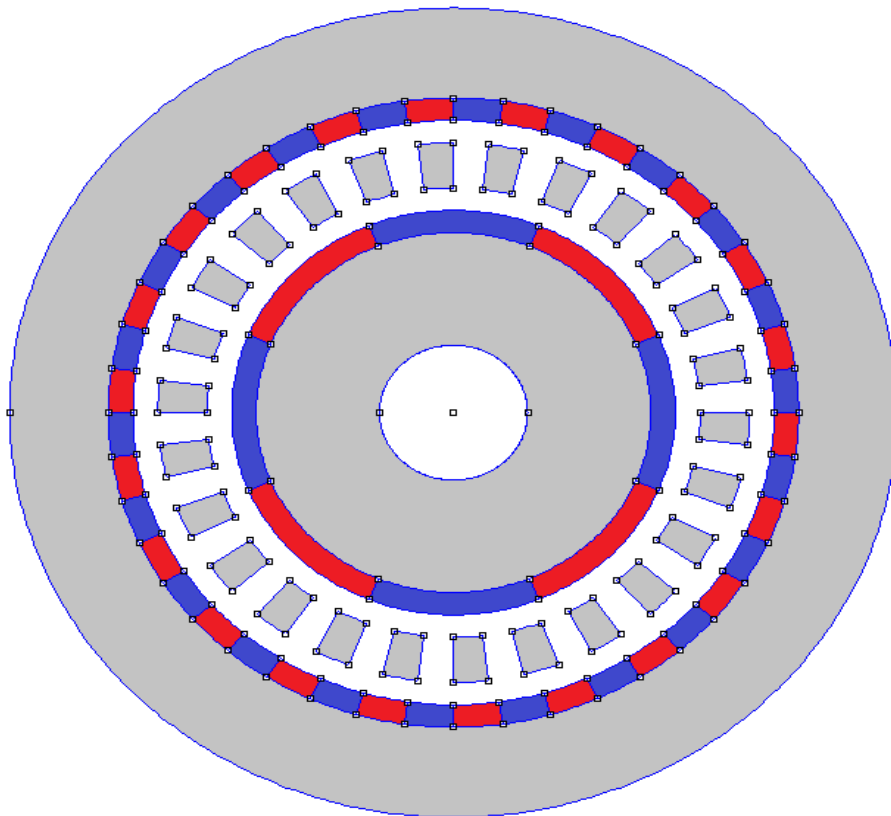


Figure II. 2 ENGRENAGE MAGNETIQUE à 17/4 paires de pôles

Les segments de modulation (c'est-à-dire les pièces polaires) sont nécessaires dans les engrenages magnétiques afin de transmettre le couple à différentes vitesses de rotation. La figure II.3, représente la densité de flux (induction  $B(T)$ ) des rotors interne et externe. L'engrenage présente 22 et 4 paires de pôles externe et interne respectivement.

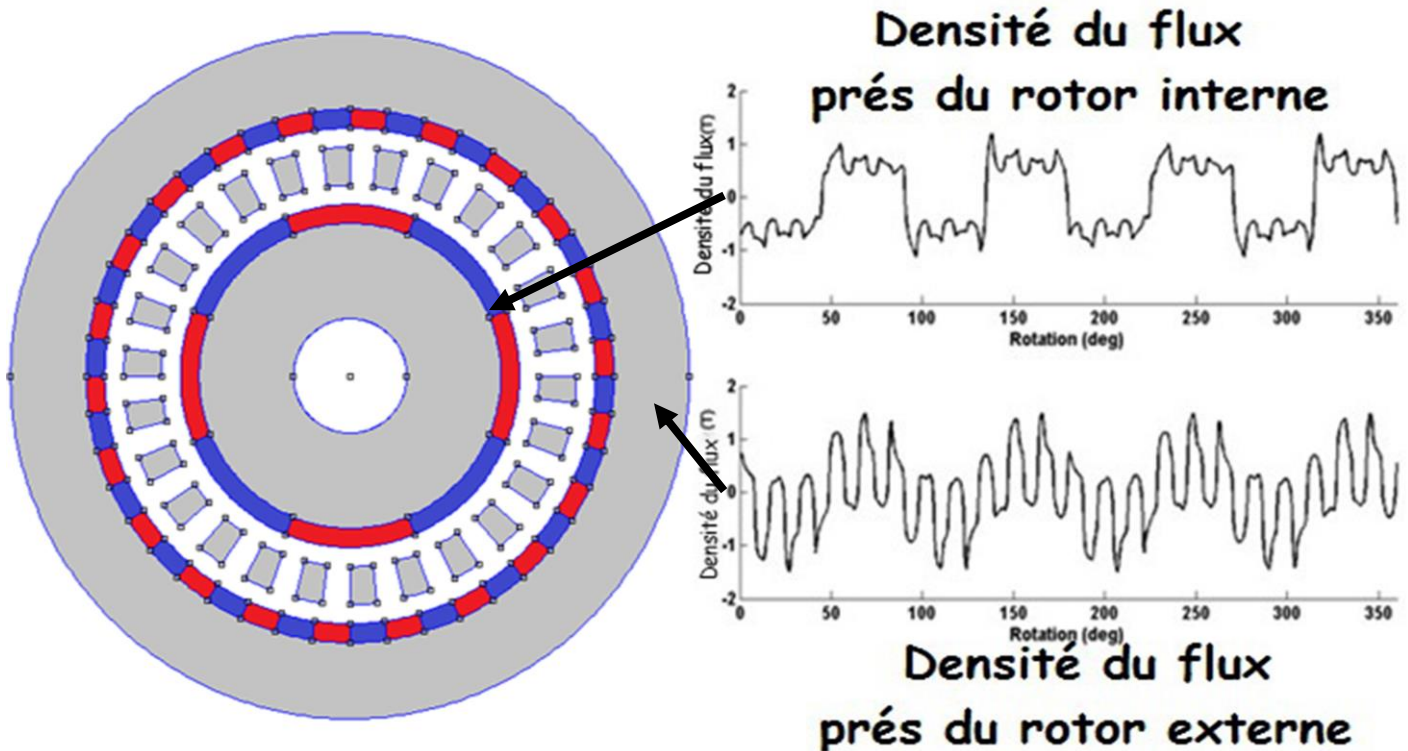


Figure II. 3 La modulation de la densité de flux radial due aux pièces polaires dans un engrenage à 4 paires internes et 22 paires de pôles externes. [FRK11]

En observant les résultats obtenus, les segments de modulation servent à faire en sorte que les deux rotors ont l'air d'avoir le même nombre de pôles.

Les pièces polaires jouent un rôle essentiel dans les accouplements magnétiques, car ils permettent la transmission du mouvement à des vitesses variables.

## II.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### II.3.1 Rapport d'engrenage

En supposant qu'il n'y a aucune perte, donc la puissance en entrée sera égale à la puissance en sortie. En entrainant le rotor interne à une vitesse  $\Omega_1$  avec une puissance  $P$ , on aura donc

$$P = C_1 \Omega_1 = C_2 \Omega_2 \quad (\text{II.01})$$

$$\frac{\Omega_2}{\Omega_1} = i \quad (\text{II.02})$$

$$\frac{C_2}{C_1} = G_r \quad (\text{II.03})$$



$C_1, C_2$  : Couple exercé sur le rotor interne et le rotor externe respectivement.

$\Omega_1, \Omega_2$  : Vitesses de rotation du rotor interne et le rotor externe respectivement.

$G_r$  : Rapport du couple.

$i$  : Rapport de vitesse.

Si L'engrenage magnétique est destiné à remplacer l'engrenage mécanique dans de nombreuses applications, donc les paramètres doivent être étudiés afin de trouver un moyen de comparaison. Et pour cela on va faire une étude d'un engrenage mécanique puis un engrenage magnétique afin de faire une comparaison entre eux.

#### a. Engrenage mécanique

Pour les systèmes d'engrenage on peut définir rapport de couple  $G_r$  et le rapport de vitesse  $i$

$$\text{Avec : } i = \frac{\text{Nombre de dents du pignon menant}}{\text{Nombre de dents du pignon mené}} \quad (\text{II.04})$$

$$G_r = \frac{\text{Nombre de dents du pignon mené}}{\text{Nombre de dents du pignon menant}} \quad (\text{II.05})$$

Le rapport qu'il y'a entre  $G_r$  et  $i$  est :  $G_r = \frac{1}{i}$

Le rapport de couple est défini comme suit :

$$G_r = 1 : \quad \Omega_{\text{sort}} = \Omega_{\text{entr}}$$

$G_r > 1$  :  $\Omega_{\text{sort}} < \Omega_{\text{entr}}$  Le système d'engrenage est un réducteur de vitesse

$G_r < 1$  :  $\Omega_{\text{sort}} > \Omega_{\text{entr}}$  Le système d'engrenage est un multiplicateur de vitesse

Et pour les engrenages qui offrent plusieurs modes de fonctionnements comme l'exemple illustré dans la figure II.4, la détermination de son rapport de transmission générale quel que soit son mode de fonctionnement, se fait à partir de l'équation (II.06) dite équation de Willis (loi de Willis 1841) [WIL41].

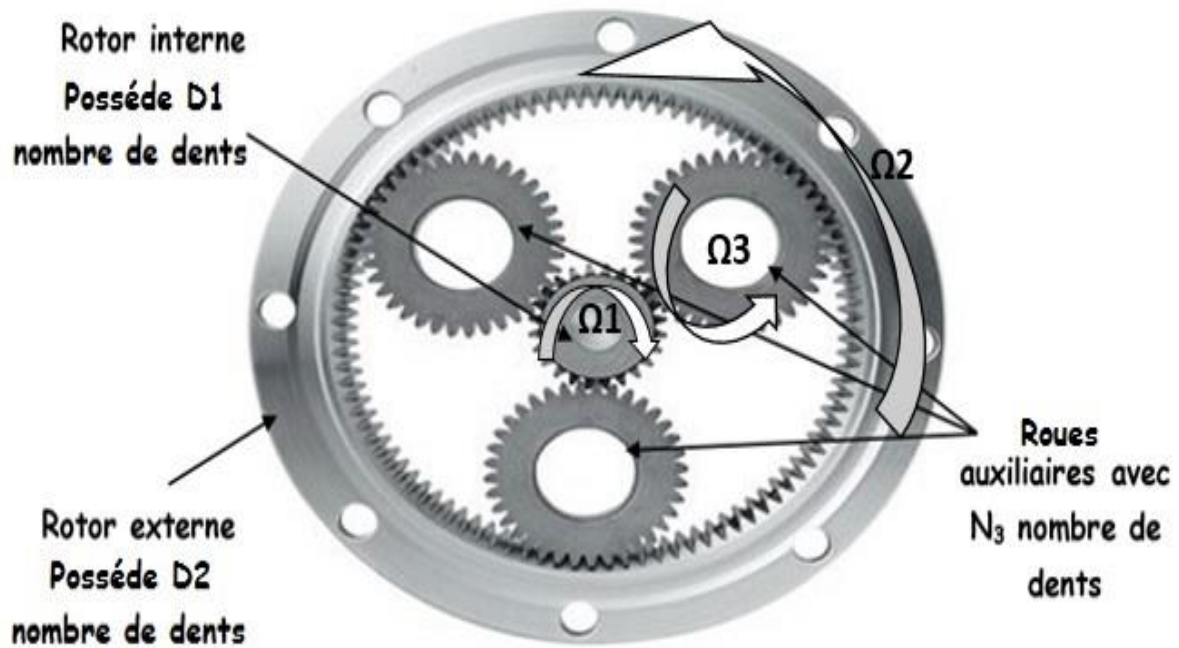


Figure II. 4 Engrenage mécanique

$$\frac{D_1}{D_1 - N_3} \Omega_1 - \frac{N_3}{D_1 - N_3} \Omega_3 - \Omega_2 = 0 \quad (\text{II.06})$$

Avec:

$D_1$ : C'est le nombre de dents du rotor interne

$D_2$ : C'est le nombre de dents du rotor externe

$N_3$ : C'est le nombre de dents des roues auxiliaires

Cette équation suppose que tous les éléments d'engrenage tournent. Il y a deux rapports d'engrenage, l'un entre les rotors interne et externe ( $\frac{D_1}{D_1-N_3}$ ) et l'autre entre les roues auxiliaires et le rotor externe ( $\frac{N_3}{D_1-N_3}$ ). Le nombre de dents du rotor externe est

$$D_2 = |D_1 - N_3| \quad (\text{II.07})$$

On suppose  $k = \frac{D_1}{D_1-N_3} = -\frac{D_1}{D_2}$  (II.08)

Alors l'équation (EQ II.06) devient :

$$k\Omega_1 + (1 - k)\Omega_3 - \Omega_2 = 0 \quad (\text{II.09})$$

$\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  et  $\Omega_3$  sont les vitesses respectives du rotor interne, rotor externe et des roues auxiliaires. Dans la plupart des modes de fonctionnements on a une pièce (Roues auxiliaires ou Rotor externe ou Rotor interne) qui est fixe.

En se basant sur les équations (II.04), (II.04), (II.09), et l'exemple de la figure II.4, nous allons donner le rapport de vitesse  $i$  et le rapport de couple  $G_r$ , de chaque cas.

**1<sup>er</sup> cas Roues auxiliaires bloqué ( $\Omega_3 = 0$ ) :**

$$i = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = k = -\frac{D_1}{D_2} \quad (\text{II.10})$$

$$G_r = -\frac{D_2}{D_1} \quad (\text{II.11})$$

**2<sup>eme</sup> cas Rotor externe bloqué ( $\Omega_2 = 0$ ) :**

$$i = \frac{\Omega_3}{\Omega_1} = -\frac{k}{1-k} = \frac{D_1}{D_1+D_2} \quad (\text{II.12})$$

$$G_r = \frac{D_1+D_2}{D_1} \quad (\text{II.13})$$

**3<sup>eme</sup> cas Rotor interne bloqué ( $\Omega_1 = 0$ ) :**

$$i = \frac{\Omega_3}{\Omega_2} = \frac{1}{1-k} = \frac{D_2}{D_1+D_2} \quad (\text{II.14})$$

$$G_r = \frac{D_1+D_2}{D_2} \quad (\text{II.15})$$

Donc on a obtenu 3 modes différents.

## b. Engrenage magnétique

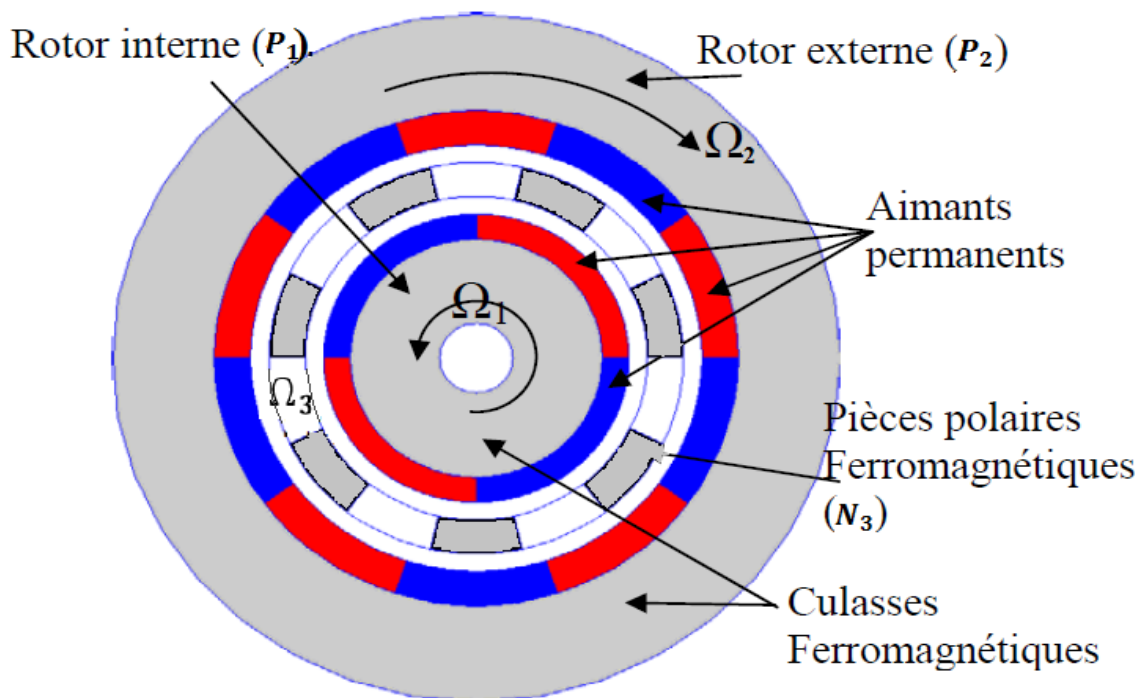


Figure II. 5 Engrenage magnétique

On notera

$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  : Les vitesses de rotation respectives du rotor interne, du rotor externe et des pièces polaires

$P_1, P_2$  : Le nombre de paires de pôles du rotor interne et du rotor externe

$N_3$  : Le nombre de pièces polaires ferromagnétiques.

On calcule l'induction magnétique créée par un seul rotor à aimants, on peut choisir le rotor interne avec les pièces polaires. La distribution de l'induction magnétique à une distance radiale  $r$  produite par le rotor interne en présence des pièces polaires peut être écrite sous la forme de l'équation II.16. La composante radiale est donnée par l'équation (II.16.1) et la composante tangentielle par l'équation (II.16.2) [ATA04] :

$$B_r(r, \theta) = \underbrace{\left\{ \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos(mP_1(\theta - \Omega_1 t) + mP_1\theta_0) \right\}}_{\text{Induction magnétique sans pièces polaires}} \times \underbrace{\left\{ \lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) \cos(jN_3(\theta - \Omega_3 t)) \right\}}_{\text{Fonction de modulation due aux pièces polaires}} \quad (\text{II.16.1})$$

Induction magnétique sans pièces polaires

Fonction de modulation due aux pièces polaires

$$B_\theta(r, \theta) = \underbrace{\left\{ \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin(mP_1(\theta - \Omega_1 t) + mP_1\theta_0) \right\}}_{\text{Induction magnétique sans pièces polaires}} \times \underbrace{\left\{ \lambda_{\theta 0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) \sin(jN_3(\theta - \Omega_3 t)) \right\}}_{\text{Fonction de modulation due aux pièces polaires}} \quad (\text{II.16.2})$$

Avec :  $b_{rm}$  ,  $b_{\theta m}$  les coefficients de Fourier des composante radiale et de la composante tangentielle de la distribution de l'induction magnétique sans les pièces ferromagnétiques.

$\lambda_{rj}$  ,  $\lambda_{\theta j}$  sont les coefficients de Fourier de la composante radiale et la composante tangentielle de la fonction de modulation résultant de l'introduction des pièces ferromagnétiques.

En développant les équations (II.16.1) et (II.16.2) on obtient :

$$\begin{aligned} B_r(r, \theta) = & \lambda_{r0}(r) \times \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos\{(mP_1(\theta - \Omega_1 t) + mP_1\theta_0)\} \quad (\text{II.17.1}) \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} b_{rm}(r) \lambda_{rj}(r) \cos\left\{(mP_1 + jN_3) \left(\theta - \frac{mP_1\Omega_1 + jN_3\Omega_3}{mP_1 + jN_3} t\right) + mP_1\theta_0\right\} \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} b_{rm}(r) \lambda_{rj}(r) \cos\left\{(mP_1 - jN_3) \left(\theta - \frac{mP_1\Omega_1 - jN_3\Omega_3}{mP_1 - jN_3} t\right) + mP_1\theta_0\right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{\Theta}(r, \Theta) = & \lambda_{\Theta 0}(r) \times \sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\Theta m}(r) \sin\{(mP_1(\Theta - \Omega_1 t) + mP_1\Theta_0)\} \\
& + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} b_{\Theta m}(r) \lambda_{\Theta j}(r) \sin\left\{(mP_1 + jN_3) \left(\Theta - \frac{mP_1\Omega_1 + jN_3\Omega_3}{mP_1 + jN_3} t\right) + mP_1\Theta_0\right\} \\
& + \frac{1}{2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{j=1,2,3,\dots} b_{\Theta m}(r) \lambda_{\Theta j}(r) \sin\left\{(mP_1 - jN_3) \left(\Theta - \frac{mP_1\Omega_1 - jN_3\Omega_3}{mP_1 - jN_3} t\right) + mP_1\Theta_0\right\}
\end{aligned} \tag{II.17.2}$$

La forme générale de chaque harmonique de l'espace est donnée par l'équation II.18

$$B = \text{Amplitude} * \cos[\text{Paires de poles} \times (\Theta - \text{Vitesse} \times t) + \text{Constante} \times \Theta_0] \tag{II.18}$$

En utilisant les équations (II.17.1), (II.17.2) et (II.18) on peut déduire le nombre de paires de pôles de chaque harmonique d'espace :

$$\begin{aligned}
P_{m,q} &= |mP_1 + qN_3| \tag{II.19} \\
m &= 1,3,5, \dots, \infty \\
q &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots, \pm \infty
\end{aligned}$$

Et la vitesse des harmoniques d'espace :

$$\begin{aligned}
\Omega_{m,q} &= \frac{mP_1}{mP_1 + qN_3} \Omega_1 + \frac{qN_3}{mP_1 + qN_3} \Omega_3 \tag{II.20} \\
m &= 1,3,5, \dots, \infty \\
q &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots, \pm \infty
\end{aligned}$$

La condition nécessaire à la transmission du couple est : le nombre de paires de pôles du rotor externe  $P_2$  doit être égale au nombre de paires de pôles d'une harmonique d'espace  $P_{m,q}$  pour le quel  $q \neq 0$  [ATA04].  $P_2 = P_{m,q}$  et  $q \neq 0$  (II.21)

La combinaison  $m = 1$  et  $q = -1$  c'est là où l'harmonique porte l'amplitude la plus importante, Donc à partir de l'équation 6 le rotor externe doit avoir un nombre de paires de pôles  $P_2$  qui est égale à :  $P_2 = P_{1,-1} = |P_1 - N_3|$  (II.22)

La vitesse du rotor doit elle aussi correspondre à la même vitesse de l'harmonique qui porte la même combinaison ( $m = 1$  et  $q = -1$ )

$$\Omega_2 = \frac{P_1}{P_1 - N_3} \Omega_1 - \frac{N_3}{P_1 - N_3} \Omega_3 \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Supposant } k = \frac{P_1}{P_1 - N_3} = -\frac{P_1}{P_2} \quad (\text{II.24}) \quad (P_1 - N_3) < 0$$

En remplaçant (II.24) dans (II.23) :

$$\Omega_2 = k\Omega_1 + (1 - k)\Omega_3$$

$$\text{Et au final} \quad k\Omega_1 + (1 - k)\Omega_3 - \Omega_2 = 0 \quad (\text{II.25})$$

L'équation (II.25) est identique à l'équation de WILLIS (II.06), Nous pouvons donc remplacer l'engrenage mécanique concentrique par l'engrenage magnétique concentrique, de plus une remarque à ajouter concernant la valeur de  $k$  dans un engrenage mécanique qui est limitée et qui doit être comprise entre -1 et 0 ( $-1 < k < 0$ ) mais par contre dans le magnétique elle peut prendre n'importe quelle valeur (voir équation II.21). Cependant, dans la plupart des cas pratiques les engrenages magnétiques portent généralement  $P_1 < P_2$  donc  $k$  est compris aussi en -1 et 0 ( $-1 < k < 0$ )

On vient de démontrer que l'équation de WILLIS de l'engrenage mécanique est identique à celle correspondante à l'engrenage magnétique, Donc ce dernier peut fonctionner de la même manière et les mêmes modes de fonctionnements. Par exemple Si on maintient les pièces polaires (Barres ferromagnétiques) fixe ( $\Omega_3 = 0$ ) comme illustré sur la figure II.6, Si l'entrée est appliquée sur le rotor interne et la sortie est assurée par le rotor externe alors on peut trouver le rapport de vitesse  $i$  et le rapport du couple  $G_r$  comme suit :

$$i = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = k = -\frac{P_1}{P_2} \quad (\text{II.26})$$

$$G_r = -\frac{P_2}{P_1} \quad (\text{II.27})$$

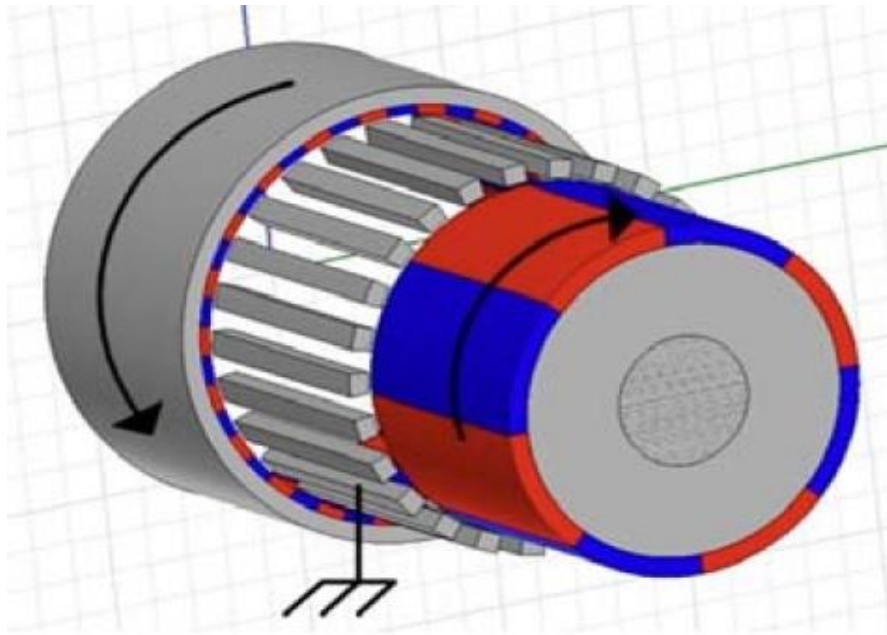


Figure II. 6 Les pièces polaires (Barres ferromagnétiques) fixe ( $\Omega_3 = 0$ )

### II.3.2 Points d'équilibre

Les points d'équilibres révèlent les caractéristiques comportementales d'un engrenage. Si un rotor est fixe tandis que l'autre est en rotation, alors un couple sera exercé sur le rotor fixe jusqu'à atteindre l'indice de couple de décrochage auquel il va tourner lui aussi.

Si le rotor est maintenu en dessous du point de décrochage, et relâché, il oscille entre le point de décrochage comme un ressort. Cela révèle la protection naturelle contre les surcharges de l'engrenage, Donc si on applique un couple qui dépasse le couple nominal d'accrochage, on risque de le faire glisser.

Une simulation peut révéler les points d'équilibre de l'engrenage. La figure II.7 représente les couples exercés sur les deux rotors qui se croisent aux points d'équilibre, Pour ce qui est du rotor qui est tenu fixe, Son mouvement sa vitesse et son couple est en fonction du rapport de l'engrenage ( $i$  et  $G_r$ ) .



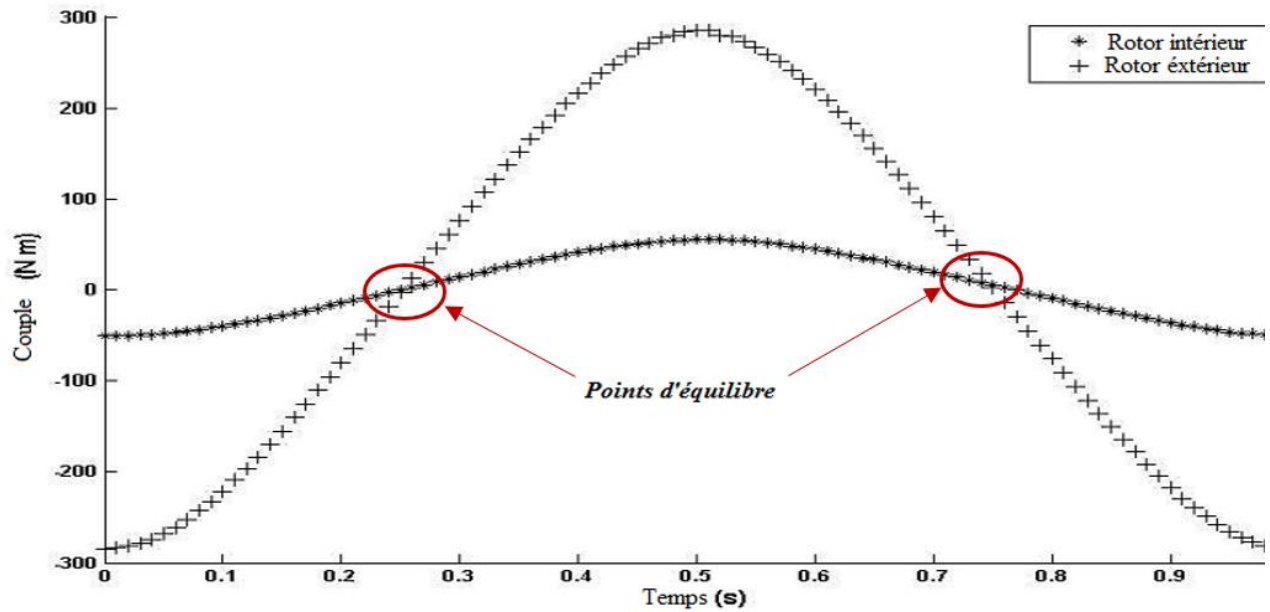


Figure II. 7 Courbes de couple révélant des points d'équilibre pour l'engrenage magnétique 22/4. [FRK11]

## II.4 IMPACT DES PARAMETRES DE CONSTRUCTION SUR LA VALEUR DU COUPLE

Sur la base de l'expression analytique développée pour le couple magnétique, les impacts des paramètres de conception sur la capacité de couple pourraient être étudiés. Dans ce document, le couple de décrochage du rotor extérieur, qui est situé au point maximal de la courbe de couple du rotor externe sur la figure II.07, est utilisé pour caractériser la capacité de couple de l'engrenage magnétique étudié. Comme les dimensions des deux culasses du rotor externe et interne sont fixes, les paramètres de conception qui influent sur la capacité de couple seraient le nombre de paires de pôles  $P_1$  et  $P_2$ , la géométrie des pièces polaires, les deux épaisseurs des aimants permanents et les deux longueurs d'entrefer

### II.4.1 nombre de paires de pôles $P_1$ et $P_2$ :

D'après Les équations (II.04) et (II.05), il y a beaucoup de combinaisons possibles de  $P_1$  et de  $P_2$ , ce qui donne un rapport d'engrenage. Cependant, l'étude de [ATA04] a montré que certaines combinaisons irraisonnables peuvent provoquer un couple de décrochage important (un couple qui dépasse le couple nominal d'accrochage), Donc vaut mieux exclure ces combinaisons potentielles de paires de pôles. Un facteur de couple de crantage a été défini dans

[ZHU00] pour indiquer le niveau du couple de crantage. De même, les facteurs de couple de crantage des rotors externe et interne,  $C_{fi}$  et  $C_{fo}$ , pourraient être donnés par:

$$C_{fi} = \frac{2P_1N_3}{N_{13}} = \frac{2P_1(P_1+P_2)}{N_{13}} \quad (\text{II.28})$$

$$C_{fo} = \frac{2P_2N_3}{N_{23}} = \frac{2P_2(P_1+P_2)}{N_{23}} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$C_{fi}$  et  $C_{fo}$  : facteurs de couple de crantage (détente) des rotors externe et interne (En anglais : Cogging torque factors of the outer and inner rotors)

$N_{13}$  : est le plus petit commun multiple (PPCM) de  $2P_1$  et  $N_3$

$N_{23}$  : est le plus petit commun multiple (PPCM) de  $2P_2$  et  $N_3$

Le facteur de couple de crantage plus petit implique un couple de crantage plus petit. Selon les équations (II.28) et (II.29), si  $N_{13}$  et  $N_{23}$  sont plus grands alors des facteurs de couple et des couples plus faibles ont pu être obtenus. Cette règle est appliquée dans la sélection des combinaisons de  $P_1$  et  $P_2$ , qui sont données dans le tableau II.1.

A ajouter aussi qu'un grand nombre de paires de pôles entraînera un grand nombre d'aimant permanent et de matériau ferromagnétique à utiliser et qui va aussi alourdir notre engrenage.

Les combinaisons de paires de pôles sélectionnées, Le rapport de couple  $G_r$ , Les couples de décrochage déterminés avec une méthode analytique et par l'analyse par éléments finis (AEF) et le poids des aimants permanents (AM) sont démontrés par [ZHA14] et les résultats sont inclus dans le tableau II.1.

$P_1 / P_2$	$G_r$	Couple décrochage (analytique) [Nm]	Couple décrochage (AEF) [Nm]	Poids des PM [Kg]
11/2	5.5	496	489	6.85
16/3	5.33	715	704	7.44
22/4	5.5	837	826	7.78
23/4	5.75	873	864	7.87
26/5	5.2	950	938	8.01
28/5	5.6	973	958	8.07

Tableau II. 1 Effet des  $P_1 / P_2$  sur le couple. [ZHA14]

Comme on peut le voir sur le tableau II.1, si on maintient le rapport  $G_r$  autour de 5.5 on distingue directement l'influence de la combinaison de paires de pôles sur la valeur du couple obtenue. En raison de la non-linéarité du modèle AEF, le couple de décrochage obtenu à partir de AEF est légèrement inférieur à celui de la méthode analytique développée.

Dans le cas de  $P_1 / P_2 = 11/2$ , le couple de décrochage analytique est seulement de 496 Nm. Avec l'augmentation de  $P_1$  et de  $P_2$ , le couple de décrochage augmente rapidement puis sature à un certain niveau.

Au fur et à mesure que  $P_1$  et  $P_2$  augmentent, l'épaisseur de la culasse diminue proportionnellement, ce qui entraîne une augmentation de la consommation de AM et un couple de décrochage plus élevé. Cependant, la croissance du couple de décrochage ne serait pas aussi importante lorsque le  $P_1$  et  $P_2$  atteignent un certain niveau. D'après l'analyse ci-dessus, on trouve qu'un plus grand nombre de paires de pôles AM est préféré pour un rapport d'engrenage donné. Cependant, les dimensions, le poids et le facteur économique imposent un compromis sur la sélection de  $P_1$  et  $P_2$ .

## II.4.2 Géométrie des pièces polaires :

La pièce polaire figure II.8 est mise à l'échelle par  $\tau_m/\tau_p$  avec  $\tau_l/\tau_p$  dans cet article. La figure II.9 montre la variation du couple en fonction de  $\tau_m/\tau_p$  et  $\tau_l/\tau_p$  variant de 0.3 à 0.8, alors que les autres paramètres de conception sont fixes. Le profil de la courbe II.2 ressemble à un dôme, et le couple maximal de 897 Nm est atteint aux alentours de  $\tau_m/\tau_p = 0,54$  et  $\tau_l/\tau_p = 0,48$ .

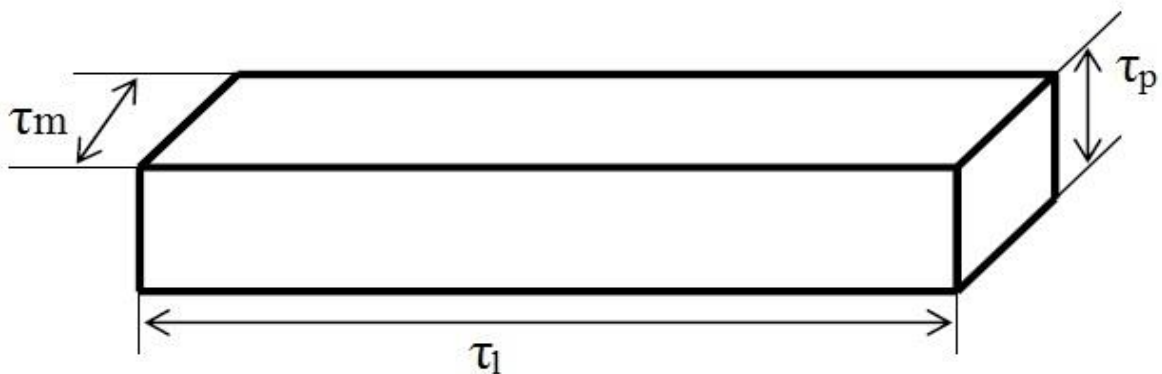


Figure II. 8 Exemple d'une pièce polaire rectangulaire

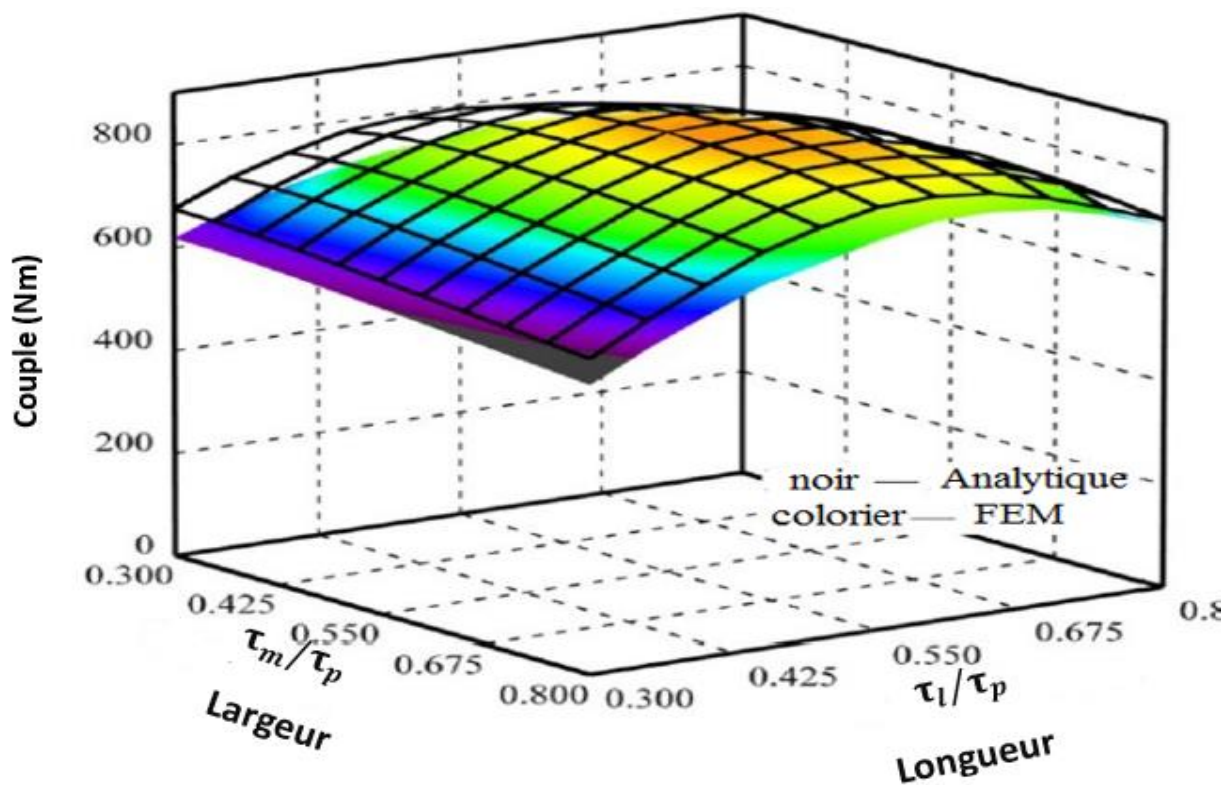


Figure II. 9 Effet de la variation des dimensions de la pièce polaire sur le couple. [ZHA14]

Si  $\tau_m/\tau_p$  est trop petit, l'espace entre les aimants permanents des rotors extérieur et intérieur serait principalement rempli d'air, dont la perméabilité est très faible, ce qui conduit à des réluctances élevées. Ceci induira de faibles densités de flux dans les deux entrefers et une capacité de couple inférieure.

Inversement, si la valeur de  $\tau_m/\tau_p$  est suffisamment élevée, il se produira un flux de fuite important qui peut se fermer entre les pièces polaires et les aimants adjacents sur le même rotor par l'intermédiaire d'un seul entrefer latéral. Par conséquent, le couple aurait une tendance à la baisse lorsque  $\tau_m/\tau_p$  dépasse 0,6, comme le montre la figure II.9.

Ensuite, quand  $\tau_l/\tau_p$  est maintenu petit, la valeur des réluctances est presque la même à la valeur des réluctances sans les pièces polaires, ce qui implique que l'effet de modulation causé par les pièces polaires est assez médiocre.

Avec la croissance de  $\tau_l/\tau_p$ , la différence entre les réluctances radiales avec et sans pièce polaire devient plus apparente, ce qui pourrait améliorer l'effet de modulation.

De plus, pour un diamètre extérieur de l'engrenage fixé par le cahier de charge, un grand  $\tau_l/\tau_p$  diminuerait aussi le volume des aimants permanents, ce qui peut réduire la capacité de couple à son tour.

A noter que l'écart qu'il y'a entre les valeurs de couples calculé analytiquement ou par la méthode des éléments finis, c'est parce que la méthode analytique ne prend pas en considération la saturation de l'induction magnétique.

Clairement, la géométrie des pièces polaires joue un rôle majeur dans la capacité de couple de l'engrenage magnétique étudié. Il est préférable de régler  $\tau_m/\tau_p$  et  $\tau_l/\tau_p$  autour de 0.5 pour contrôler la réluctance magnétique et le flux de fuite dans une plage raisonnable.

### II.4.3 Epaisseurs des aimants permanents :

La figure II.10 montre l'effet qu'apporte la variation d'épaisseurs des aimants permanents au rotor interne et externe sur la valeur du couple, en variant  $h_{ri}$  (épaisseurs des aimants permanents qui se trouve au rotor interne) et  $h_{re}$  (épaisseurs des aimants permanents qui se trouve au rotor externe) de 3 à 15mm on obtient la courbe suivante

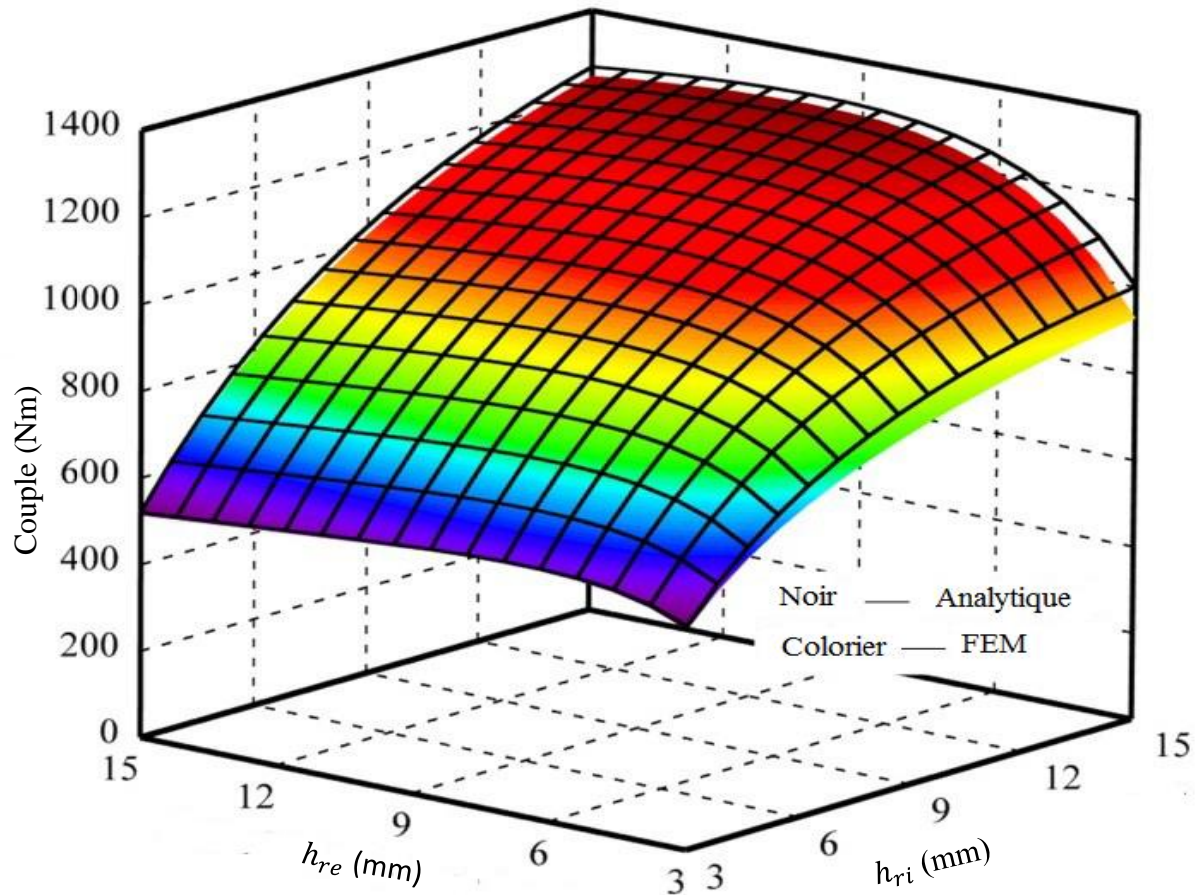


Figure II. 10 Effet de la variation d'épaisseurs des aimants permanents sur le couple.[ZHA14]

Plusieurs observations importantes de la figure II.10 pourraient être résumées comme suit: Tout d'abord, l'augmentation de l'épaisseur des aimants implique l'augmentation du couple de l'engrenage magnétique.

Deuxièmement, le couple de l'engrenage magnétique est plus sensible à la bague à aimants magnétique du rotor interne (entrée) qu'à la bague à aimants magnétique du rotor externe (sortie), car l'entrée a tendance à améliorer davantage la capacité de couple que la sortie avec la même augmentation d'épaisseur

Troisièmement, il est intéressant de noter que pour ce qui est des augmentations, le couple augmentera d'abord rapidement puis diminuera légèrement. En effet, si vous augmentez tout en conservant les autres paramètres inchangés, vous obtiendrez un couple à la sortie plus importante, mais par contre le couple d'entrée va être réduit

Donc si on augmente l'épaisseur des deux bagues d'aimants permanents au maximum ça résulte la diminution du couple parce que la bague du rotor d'entrée joue un rôle plus important dans la transmission

On peut conclure par dire que l'épaisseur des aimants permanents peut être un avantage dans l'amélioration du couple à la sortie si on respect une plage de valeurs qu'on peut définir, mais en revanche si on dépasse cette plage de valeurs la valeur du couple n'augmente pas mais au contraire diminue

#### II.4.4 Epaisseurs d'entrefers :

Dans cette partie nous allons aborder l'effet de la variation de l'entrefer sur la valeur du couple, et pour cela on pose la figure II.11, qui montre le profil du couple en variant  $e_i$  et  $e_e$  qui sont les épaisseurs l'entrefer interne et entrefer externe respectivement.

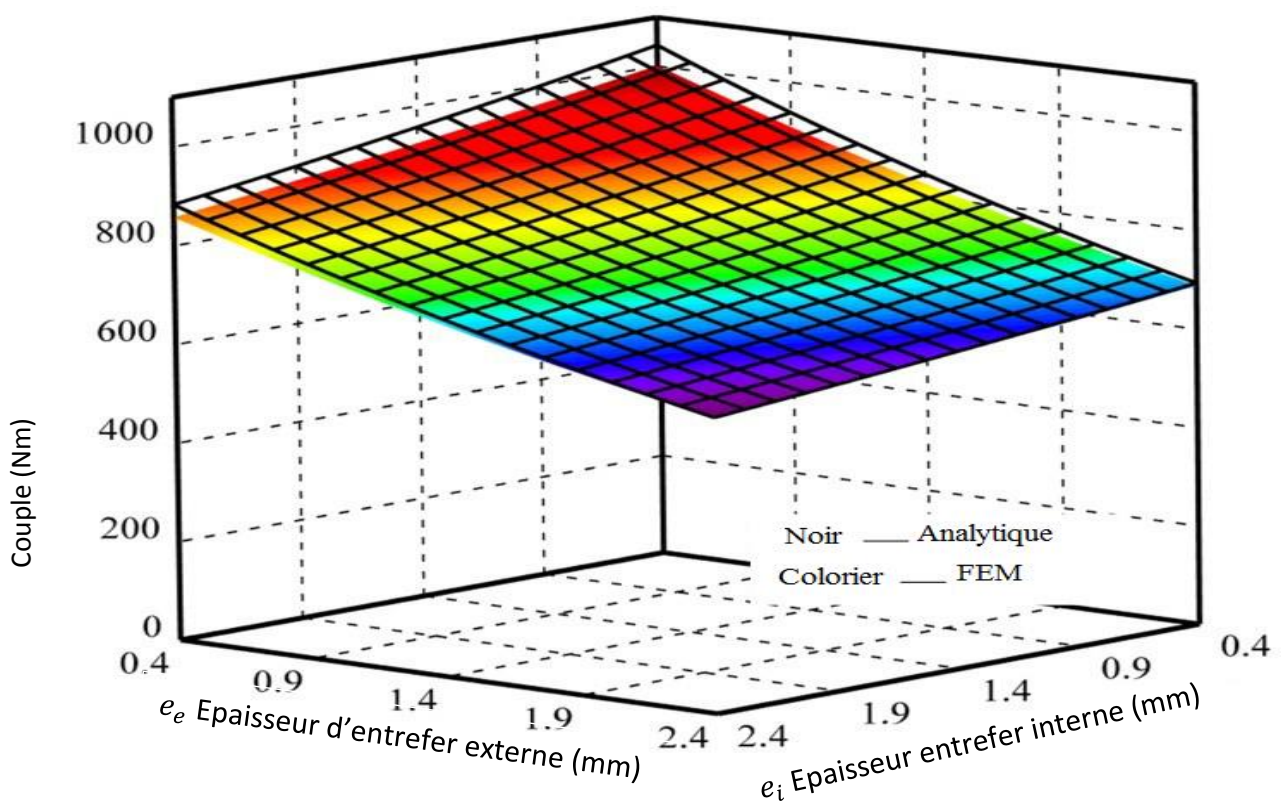


Figure II. 11 Effet de la variation de l'entrefer sur le couple. [ZHA14]

On peut observer que l'augmentation de  $e_i$  et  $e_e$  entraîne la diminution du couple, de façon presque linéaire, principalement en raison de l'augmentation de la réluctance d'entrefer.

De même, les résultats analytiques et par FEM sont presque égaux dans la plupart des domaines sauf la zone où le  $e_i$  et  $e_e$  est trop petit.

Et il est important de noter que les niveaux d'influence des deux entrefers sur le couple sont différents. En conservant  $e_e = 0,4$  mm et en changeant  $e_i$  de 0,4 mm à 2,4 mm, le couple produit subira une réduction de taille de 990 Nm à 850 Nm.

En revanche, en conservant  $e_i$  à 0,4 mm et en changeant  $e_e$  de 0,4 mm à 2,4 mm, le couple produit diminue considérablement de 990 Nm à 650 Nm.

Pour expliquer ceci, Si  $e_e$  (entrefer externe) est grand, il y'aurait une concentration du flux entre le rotor externe et les pièces polaires au lieu de passer à travers les deux entrefers. Ces flux de fuites ne contribueront pas à la transmission de couple.

Par conséquent, l'épaisseur de l'entrefer extérieur joue un rôle plus important dans la transmission de couple que l'entrefer interne.

Bien que les deux épaisseurs d'entrefer soient admises dans les paramètres de construction en tenant compte de la tolérance de fabrication, il est toujours préférable de noter que l'épaisseur de l'entrefer extérieur est plus importante pour la valeur de couple que l'entrefer interne lors de la conception d'un engrenage magnétique concentrique.

## II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait l'étude dans sa partie théorique du modèle de l'engrenage magnétique concentrique, et on a présenté le principe de fonctionnement de ce type d'engrenage, et montré que l'équation de WILLIS qui a été appliquée pour les engrenages mécanique est également valable dans l'engrenage magnétique et que ce dernier peut fonctionner de la même manière. On a obtenu tous les modes de fonctionnement et les équations comme ceux d'un engrenage mécanique, puis montré l'intérêt des points d'équilibre pour que les deux rotors s'accouplent entre eux ce qui va nous permettre la transmission sans contact.

La partie la plus importante de ce chapitre est l'impact des paramètres de construction sur la valeur du couple :

En première partie on a montré l'effet du nombre de pôles sur le couple et pour cela on a fixé le rapport de vitesse aux alentours de 5.5 et vu comment choisir les combinaisons de paires de pôles  $P_1$  et  $P_2$  est observé à la sortie le couple obtenu.



En deuxième partie l'étude était basée sur l'effet de la variation des dimensions de la pièce polaire sur le couple, pour cela il s'agit de varier les deux rapports  $\tau_m/\tau_p$  et  $\tau_l/\tau_p$

Cette étude paramétrique nous a permis de voir la réaction du couple vis-à-vis des différentes variations des paramètres de l'engrane et toutes ces démarches faites ont aboutis à trouver les dimensions permettant d'avoir la meilleure transmission du couple possible

**CHAPITRE III**  
**CALCULS NUMERIQUE DE L'ENGRENAGE**  
**MAGNETIQUE CONCENTRIQUE**

## III.1 INTRODUCTION

Vu la complexité du système à étudier on a opté pour une analyse par la méthode des éléments finis utilisant le logiciel FEMM. La construction du système de transmission magnétique se fera à l'aide du langage de programmation dit LUA.

LUA va nous permettre d'introduire des formes spécifiques de notre structure et aussi donner des instructions, auxquelles le logiciel FEMM va nous permettre de calculer les inductions magnétiques ainsi que les couples.

## III.2 DESCRIPTION DU LOGICIEL UTILISE

FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) est un logiciel à deux dimensions (2D) cartésiennes et deux dimensions axisymétriques, dédié à la résolution de problèmes électrostatiques et électromagnétiques dans le domaine des basses fréquences, par la méthode des éléments finis. Son caractère convivial et ses performances intéressantes en font un outil attrayant pour une Conception Assistée par Ordinateur de dispositifs électrotechniques. Il est constitué de trois parties principales [FEM16].

### III.2.1 Le préprocesseur

Permet, à l'aide de techniques issues de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), de décrire la géométrie du domaine, ses propriétés physiques et ses conditions aux limites et de réaliser un maillage de manière automatique ou manuelle avec assistance du programme.

Le tracé d'une géométrie donnée se fait en introduisant des points dont les coordonnées sont entrées au clavier et cela se passe après avoir défini le domaine d'étude, puis on définit des lignes (qui peuvent être des segments de droites ou des arcs de courbes) et l'on décrit des régions comme des parties de domaine délimitées par ces lignes.

À chaque région est attribué un matériau extrait d'une bibliothèque de matériaux dont dispose le logiciel ou bien introduit, ainsi que la taille du maillage associée. Ensuite, définir le schéma ou les données des sources (courant, densité de courant), les conditions aux limites sur les frontières spécifiques du domaine d'étude. Le domaine ainsi obtenu, constitué d'un certain nombre de milieux différents, est discrétisé en petits éléments par un maillage triangulaire ; chaque triangle étant repéré par ses trois sommets. Dans chaque élément, le potentiel vecteur est approché par un polynôme du premier degré.

### III.2.2 Le Solver

Il résout les équations linéaires ou non linéaires issues de l'assemblage des éléments, fournissant un ensemble de résultats bruts qui sont les valeurs de la grandeur inconnue en tous les nœuds du découpage. Ces résultats, stockés dans un fichier de sortie, sont alors repris par le post-processeur.

### III.2.3 Le Post-processeur

C'est un programme graphique qui permet de visualiser les résultats de calcul des champs obtenus par le Solver sous forme de graphes. Entre autre, il permet de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux. L'interface interactive du post-processeur peut fonctionner dans trois modes différents :

- En mode point, l'utilisateur peut inspecter les valeurs du champ dans n'importe quel point du domaine étudié.
- En mode contour, l'utilisateur peut relever et tracer le long d'un contour prédéterminé diverses grandeurs du champ telles que le potentiel vecteur, les composantes normales et tangentielles de l'induction magnétique et du champ magnétique, le flux, et déterminer l'effort produit ou le couple engendré ...etc.
- Le mode bloc permet à l'utilisateur de définir un sous-domaine dans une région, dont la solution est une quantité d'intégrales de surface ou de volume. Ces intégrales incluent l'énergie magnétique, la Co-énergie magnétique, l'inductance, les différents types de pertes, le courant total et le couple.

Par ailleurs, le compilateur Lua a été intégré dans le logiciel FEMM pour permettre à l'utilisateur de créer des programmes, écrits en langage Lua, facilitant la construction et l'analyse des géométries ainsi que l'évaluation des résultats du post-processeur.

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

- Magnétisme : calcul des grandeurs électriques et magnétiques dues à des aimants, à des flux imposés, à des courants continus ou variables, imposés ou induits.
- Electrostatique : à calcul en régime permanent des potentiels et champs électriques avec ou sans circulation de courants dans les milieux diélectriques ou conducteurs.

- Thermique : calcul de la répartition des températures créées par des puissances dissipées, des différences de températures ou des flux thermiques.

Le tracé d'une géométrie donnée se fait habituellement en quatre étapes pas nécessairement séquentielles:

- Placer les nœuds définissant le domaine d'étude.
- Connecter les différents nœuds entre eux par des segments de droites ou d'arcs selon la géométrie du domaine à dessiner
- Affecter à chaque région géométrique prédéfinie le matériau qui lui correspond (air, fer, aimants permanents, ...), ainsi que la taille du maillage associée. Le logiciel dispose d'une bibliothèque de matériaux qui peut être enrichi par l'utilisateur.
- Définir le schéma ou les données des sources (sens et direction des aimants)
- Indiquer les conditions aux limites sur les frontières spécifiques du domaine d'étude...

Le domaine ainsi obtenu, constitué d'un certain nombre de milieux différents, est discrétisé en petits éléments par un maillage triangulaire, chaque triangle étant repéré par ses trois sommets. Dans chaque élément, le potentiel vecteur est approché par un polynôme du premier degré.

Par ailleurs, le compilateur LUA a été intégré dans le logiciel FEMM pour permettre à l'utilisateur de créer des programmes, écrits en langage LUA, facilitant la construction et l'analyse des géométries ainsi que l'évaluation des résultats du post processeur.

De plus, toutes les boîtes de dialogues du logiciel FEMM sont analysées par le compilateur LUA, en permettant l'entrée d'équations ou expressions mathématiques en lieu et place de valeurs numériques.

Le code source LUA, ainsi qu'une documentation détaillée au sujet de la programmation en langage LUA, peuvent être obtenu sur <http://www.lua.org>.

La figure III.1 illustre l'interface interactive du logiciel FEMM version 4.2

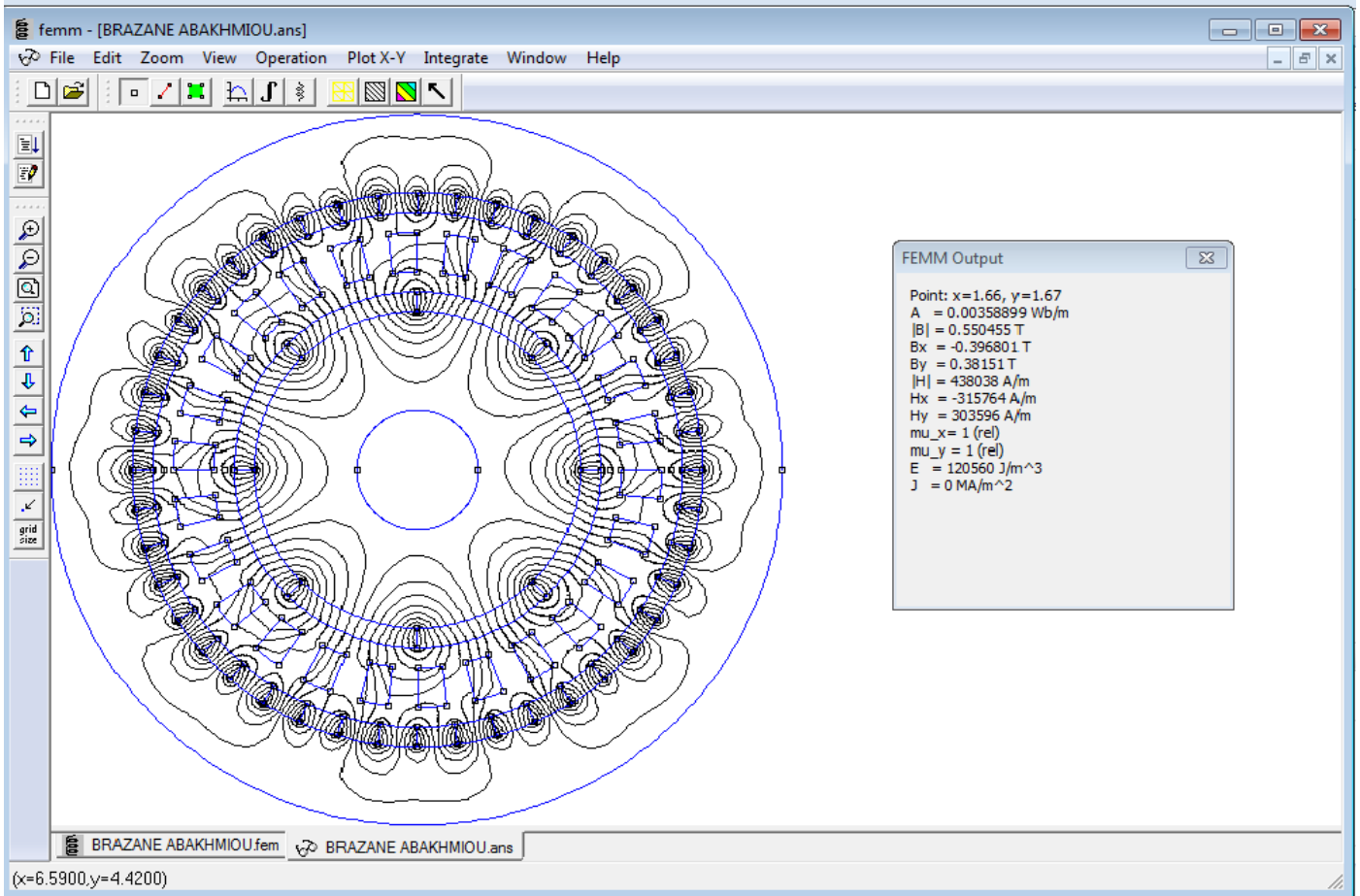


Figure III. 1 Interface interactive de FEMM

### III.3 ENGRENAGE MAGNETIQUE CONCENTRIQUE SOUS FEMM

La figure III.2. Représente le modèle de notre étude réalisée sous FEMM

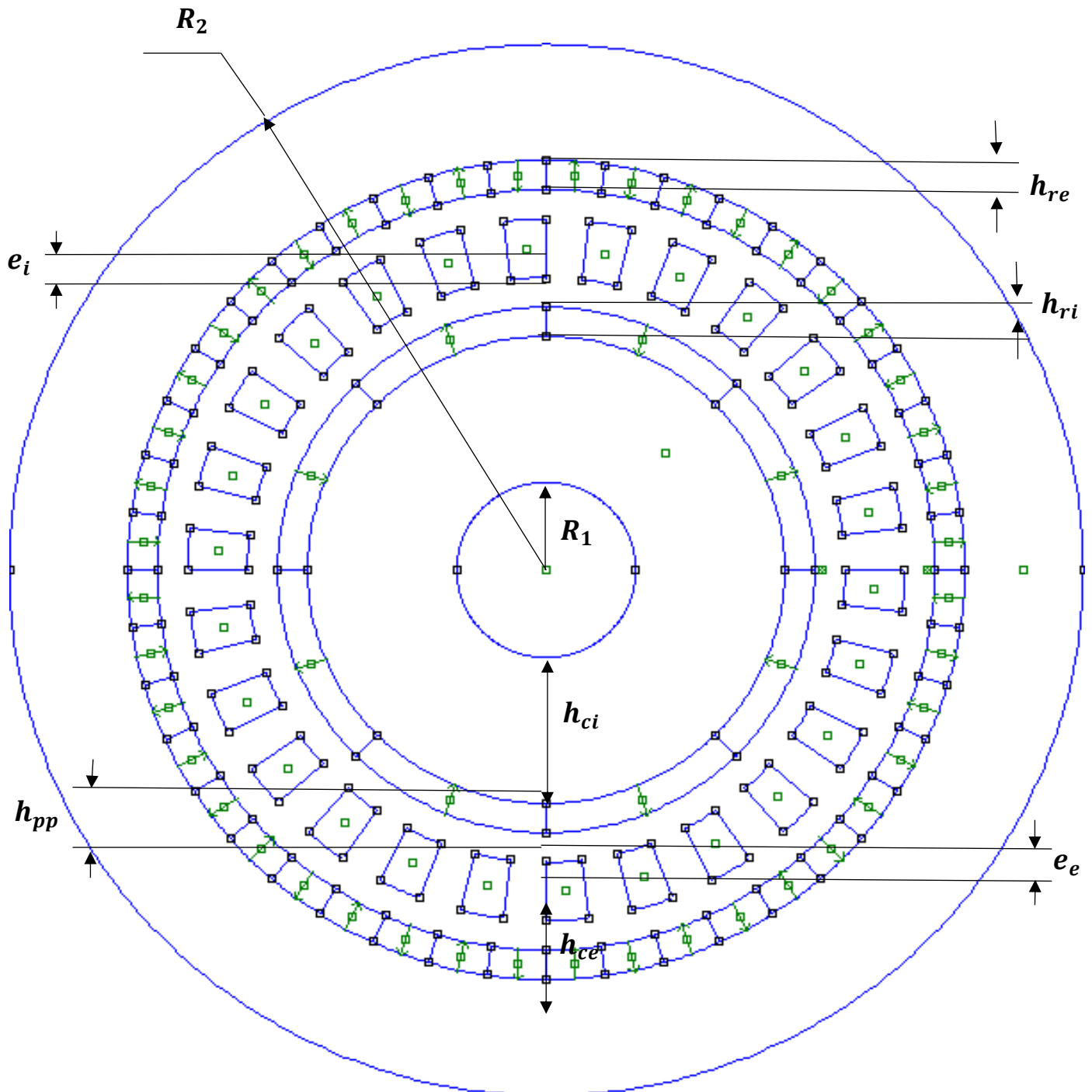


Figure III. 2 Modèle d'étude

Le tableau suivant représente les différentes dimensions de l'engrenage

$P_1$	4	Nombre de paires de pôles du rotor interne
$P_2$	22	Nombre de paires de pôles du rotor externe
$N_3$	26	Nombre de pièces polaires
D	100mm	Profondeur
$R_1$	7,5mm	Rayon de l'arbre
$R_2$	45mm	Rayon de l'engrenage
$h_{ci}$	12.5mm	Epaisseur de la culasse interne
$h_{ce}$	10mm	Epaisseur de la culasse externe
$h_{pp}$	5mm	Epaisseur de la pièce polaire
$h_{ri}$	2.5mm	Epaisseur de la bague à aimants interne
$h_{re}$	2.5mm	Epaisseur de la bague à aimants externe
$e_i$	2.5mm	Epaisseur de l'entrefer interne
$e_e$	2.5mm	Epaisseur de l'entrefer externe

Tableau III. 1 Dimensions de l'engrenage magnétique concentrique

La nature des aimants utilisés est le Néodyme Fer Bore (NdFeB 40MGOe)



### III.4 ETUDE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Nous aborderons dans cette partie l'étude du couple exerce sur les rotors interne et externe.

Pour calculer le couple exercé sur le rotor interne on fixe le rotor externe et on tourne l'interne, et on obtient la courbe suivante :

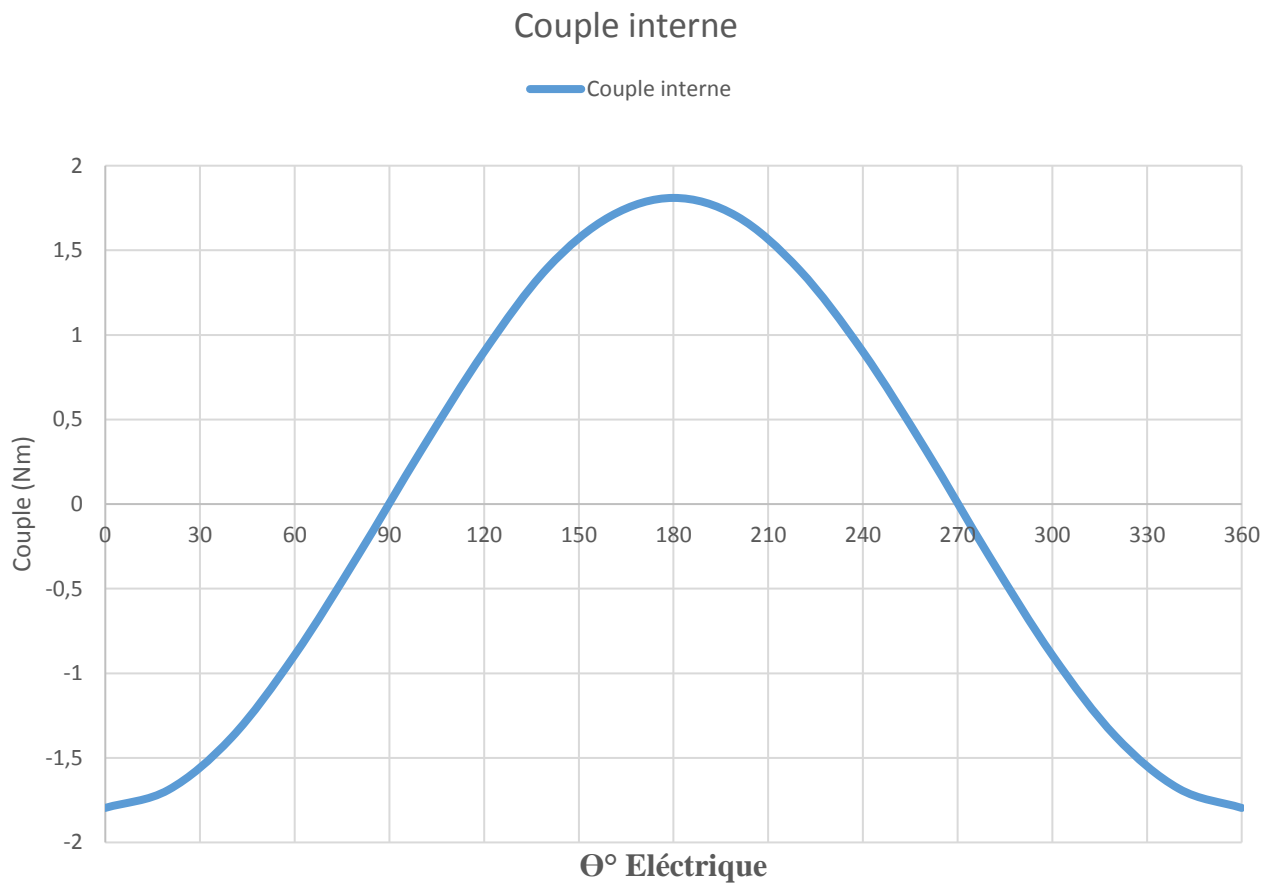


Figure III. 3 Couple interne en fonction de la position du rotor interne

A noter que dans le cas du rotor interne une période électrique est égal à 90° en angle mécanique car le rotor interne porte 4 paires de pôles.

Pour calculer le couple exercé sur le rotor externe on fixera alors le rotor interne qui nous donne la courbe suivante :



Figure III. 4 Couple externe en fonction de la position du rotor externe

Dans le cas du rotor externe une période électrique est égale à  $16,36^\circ$  en angle mécanique car le rotor interne porte 22 paires de pôles.

En incrustant les deux figures (III.3 et III.4) du couple des rotors interne et externe sur un même plan, cela nous a permis d'obtenir la figure suivante :

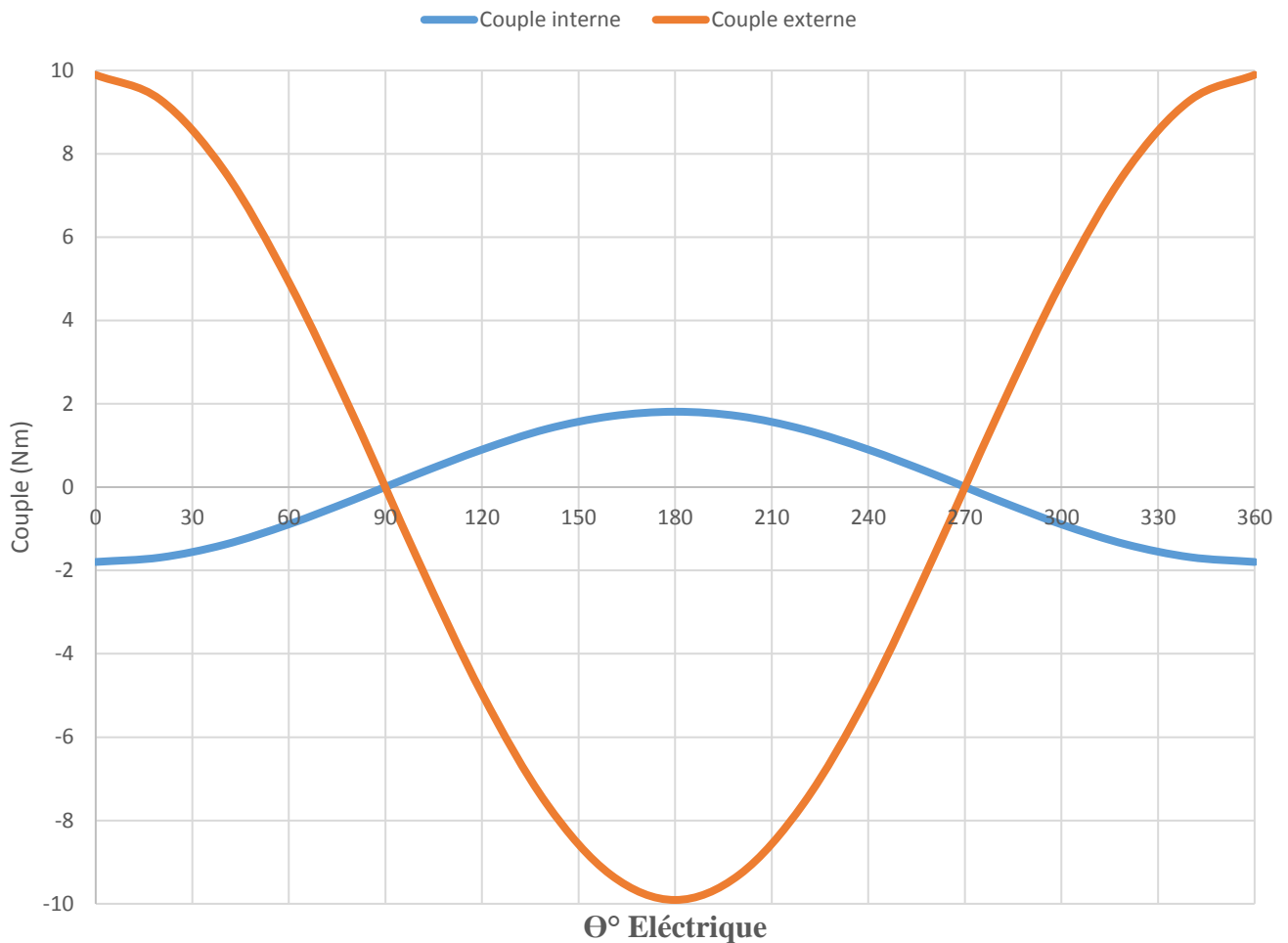


Figure III. 5 Couple interne et externe en fonction de la position des deux rotors

Cette courbe est presque identique à celle du chapitre II (Figure II.7). Et si les valeurs du couple interne et externe sont de signe différent, ça s'explique par le fait que les deux rotors tournent dans deux sens différents.

En observant les valeurs obtenues on remarque que le rapport d'engrenage est clairement distingué, qui est de 5,5.

### III.5 ETUDE DE L'INDUCTION MAGNETIQUE

Nous allons faire l'étude des inductions magnétiques en passant par deux étapes qui nous permettront de calculer l'induction pour chaque entrefer interne et externe respectivement.

#### III.5.1 Induction magnétique dans l'entrefer interne

Dans cette étape nous enlèverons les aimants permanents au niveau du rotor externe et les remplacerons par de l'air afin d'avoir l'induction au niveau de l'entrefer interne, en fixant un point dans l'entrefer lui-même et lui ordonnant de calculer l'induction, en faisant tourner le rotor interne alors on obtient l'induction radiale créée par les aimants interne telle qu'illustrée dans la figure III.7.

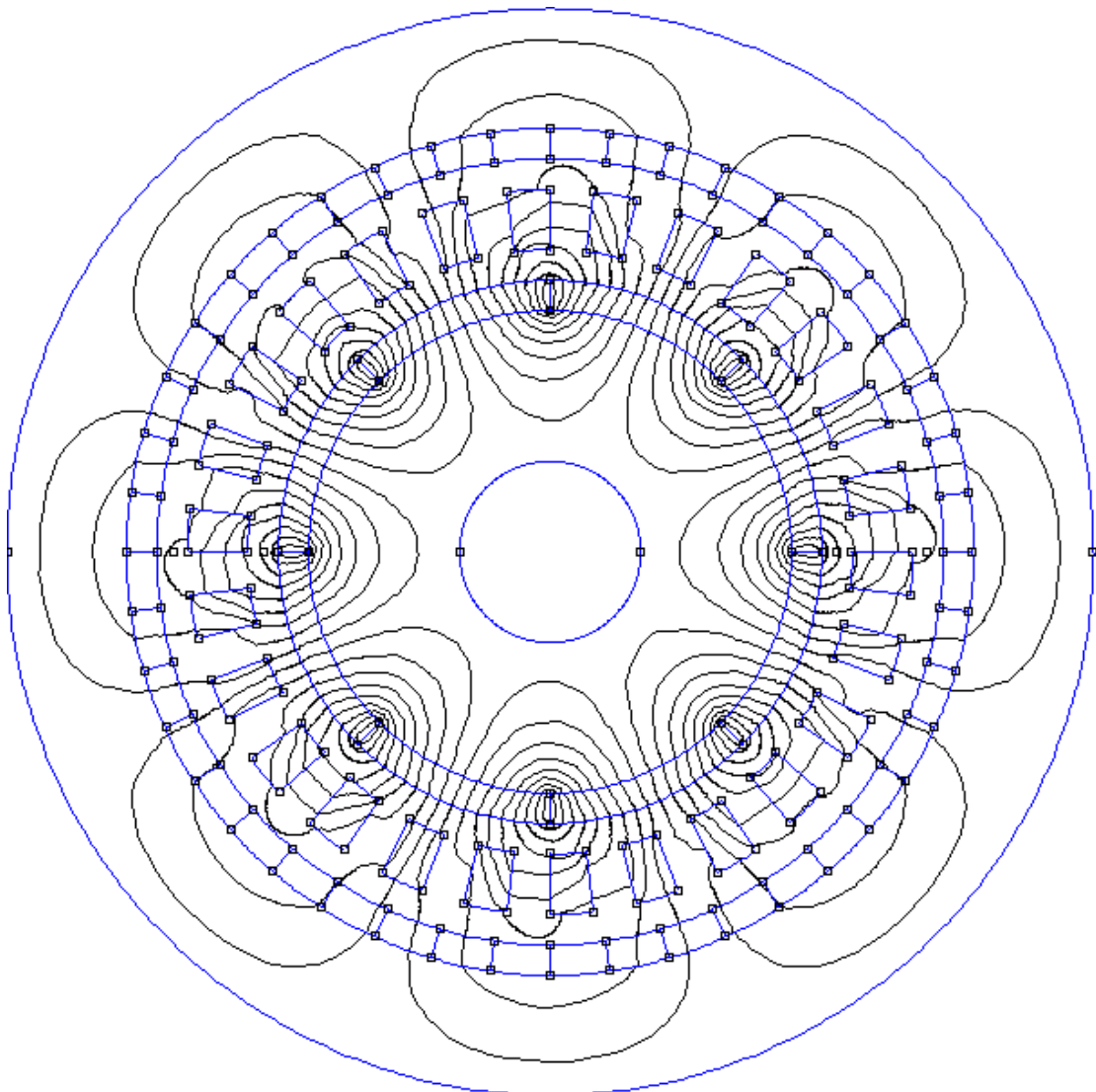


Figure III. 6 Lignes de champs créent par les aimants du rotor interne

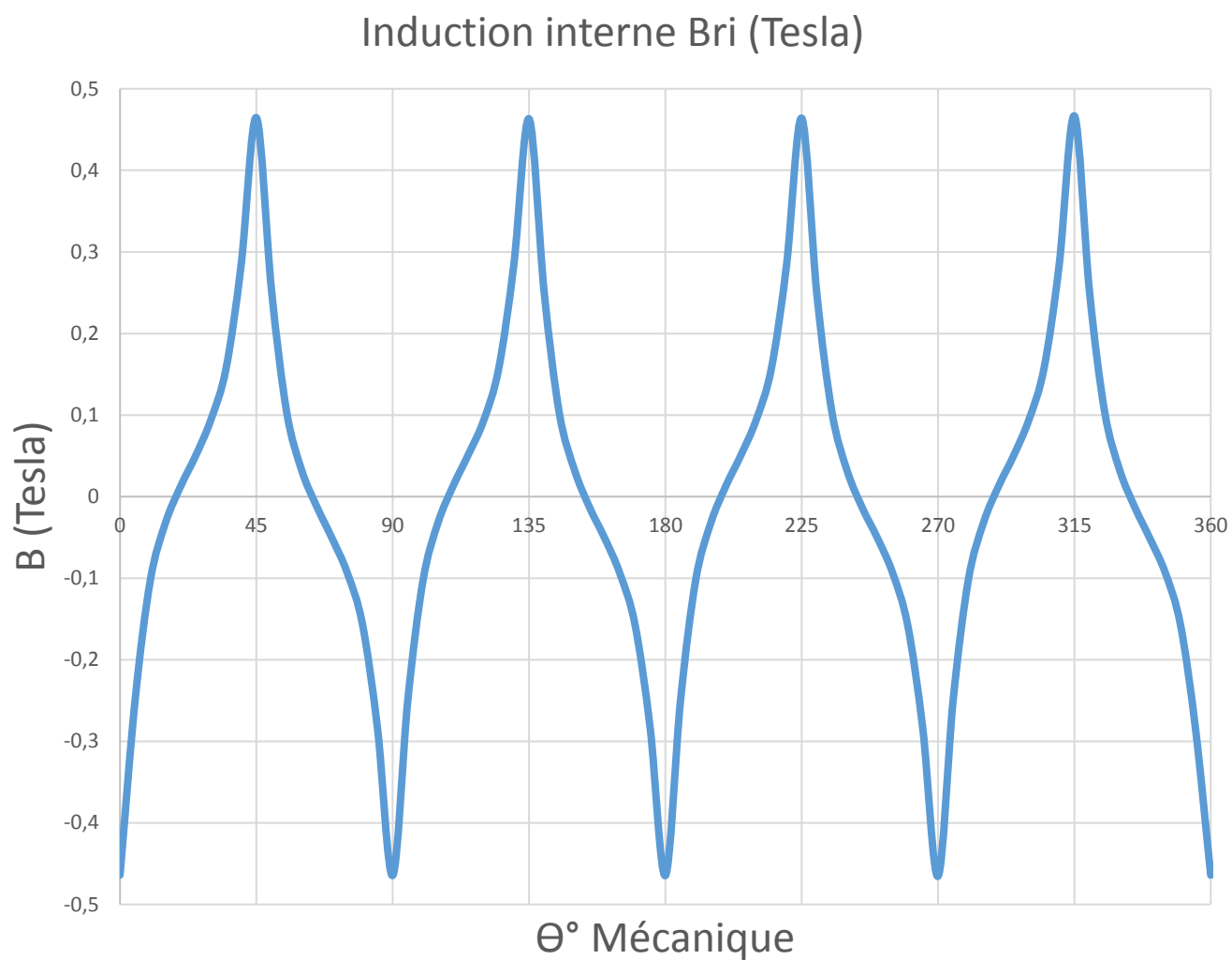


Figure III. 7 Induction radiale cr et dans l'entrefer interne

D'après la courbe obtenue à partir des valeurs trouvées nous observons que l'induction atteint la valeur crête de 0.45T (tesla).

### III.5.2 Induction magnétique dans l'entrefer externe :

Dans cette deuxième étape nous allons réintroduire les aimants permanents pour le rotor externe et remplacer ceux du rotor interne par de l'air tout en fixant un point au niveau de l'entrefer externe afin d'avoir l'induction radiale en faisant tourner le rotor externe comme donnée dans la Figure III.9.

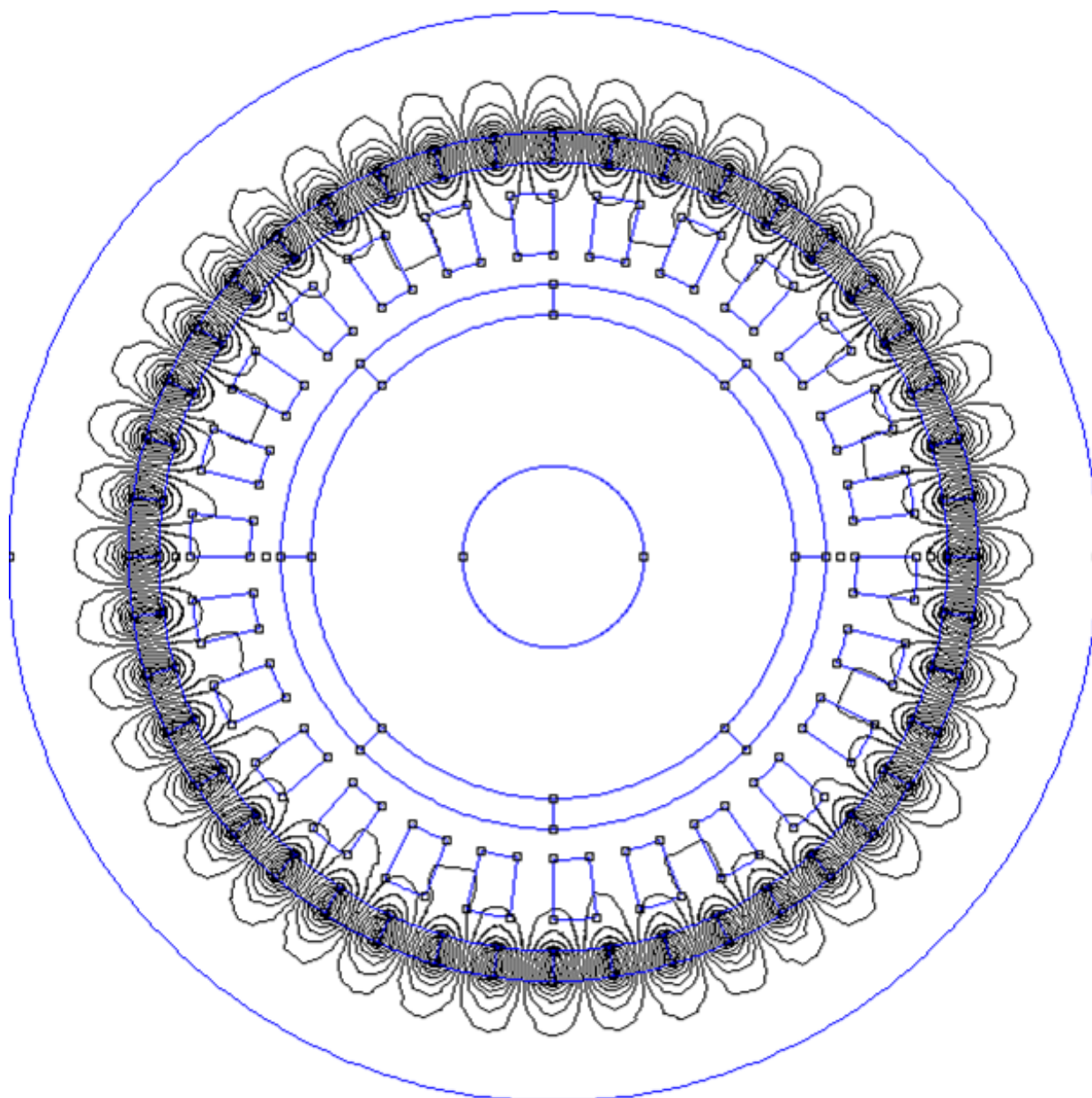


Figure III. 8 Ligne de champs créent par les aimants du rotor externe

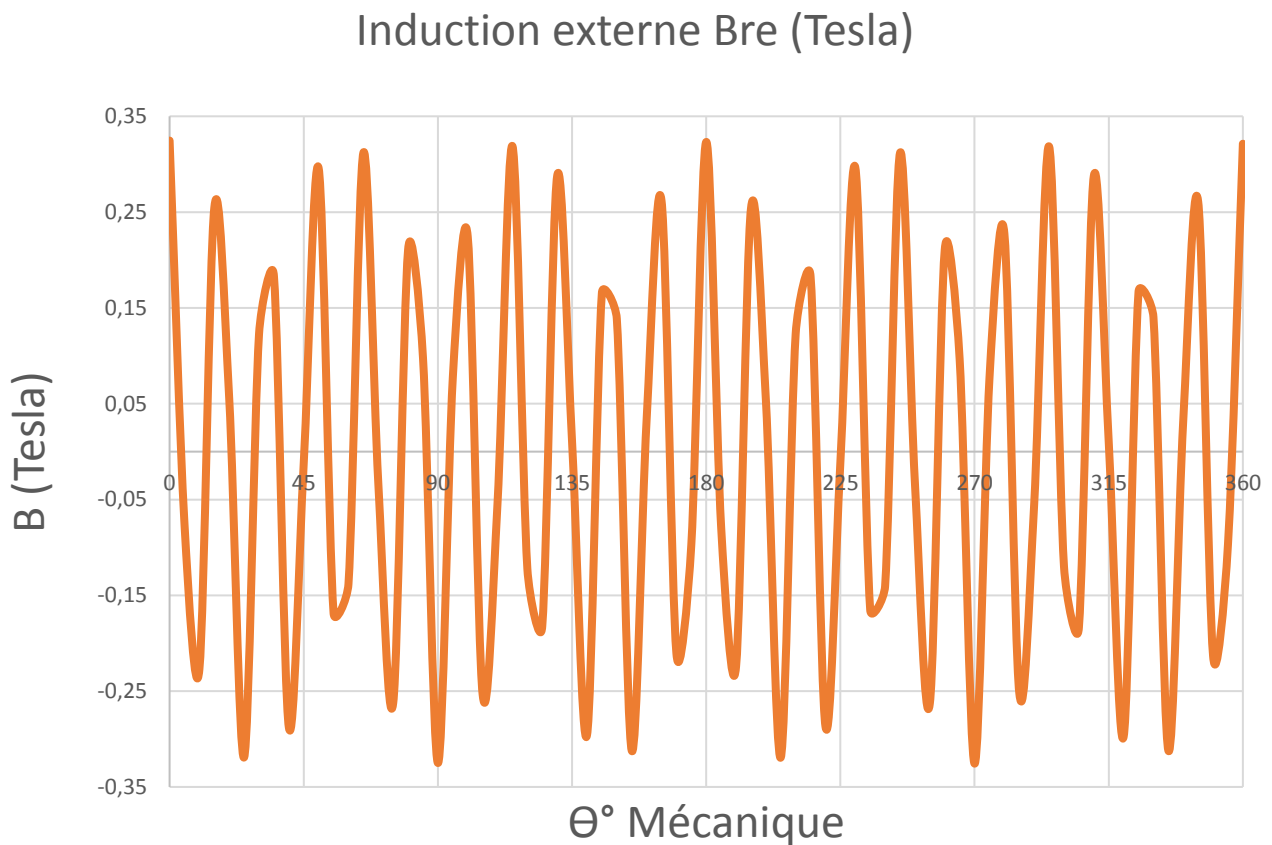


Figure III. 9 Induction radiale créent dans l'entrefer externe (par AP rotor externe)

D'après la courbe donn e par les valeurs calcul es on observe que la valeur crête pour l'induction magnétique au niveau de l'entrefer externe est de 0.32T (tesla) pour le même type d'aimants que celui utilisé pour le rotor interne.

### III.6 ETUDE DE LA VARIATION DES PARAMETRES

On s'intéresse à l'effet que peut avoir la variation des paramètres de conception sur les résultats du couple à la sortie de l'engrenage magnétique concentrique.

Et pour cela nous allons procéder de la manière suivante : On fait varier un paramètre tout en maintenant constant les autres.

#### III.6.1 Effets de l'épaisseur des bagues à aimants sur le couple

Ici nous observerons l'influence que peut avoir l'épaisseur des deux bagues à aimants des rotors interne et externe, on a choisi une plage de valeurs qui varie de 1.25mm   10mm qu'ils

soient de l'épaisseur de la bague à aimants du rotor interne  $h_{ri}$  ou de l'externe  $h_{re}$ . Nous avons obtenus les Figures III.10 et III.11 respectivement.

### Effet de la variation de l'épaisseur de la bague à aimants interne sur le couple

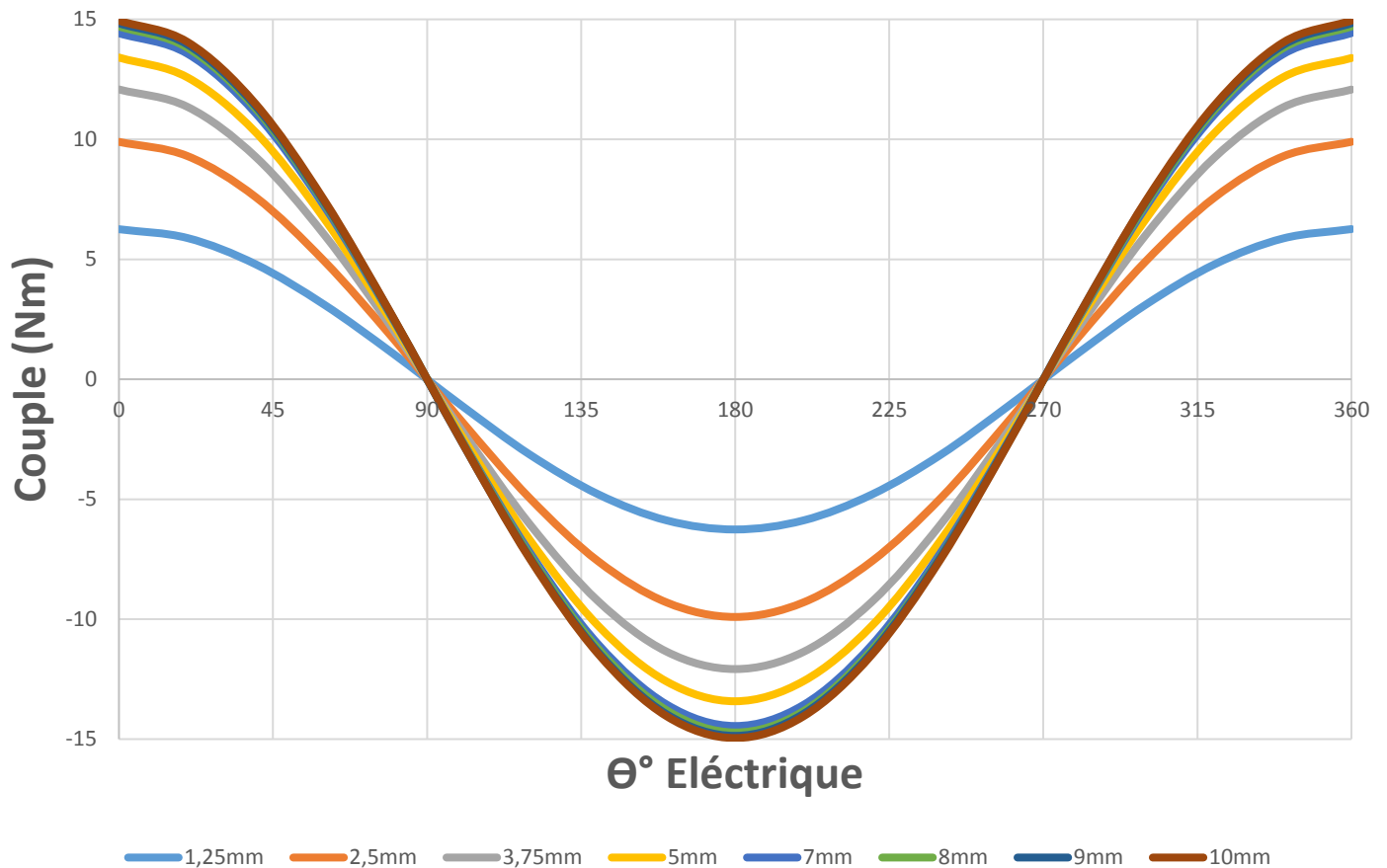


Figure III. 10 Influence de l'épaisseur des aimants permanents du rotor interne sur le couple exercé sur le rotor externe

à

$h_{ri1}=1.25\text{mm}$ ,  $h_{ri2}=2.5\text{mm}$ ,  $h_{ri3}=3.75\text{mm}$ ,  $h_{ri4}=5\text{mm}$ ,  $h_{ri5}=7\text{mm}$ ,  $h_{ri6}=8\text{mm}$ ,  $h_{ri7}=9\text{mm}$ ,  $h_{ri8}=10\text{mm}$



## Effet de la variation de l'épaisseur de la bague a aimants externe sur le couple

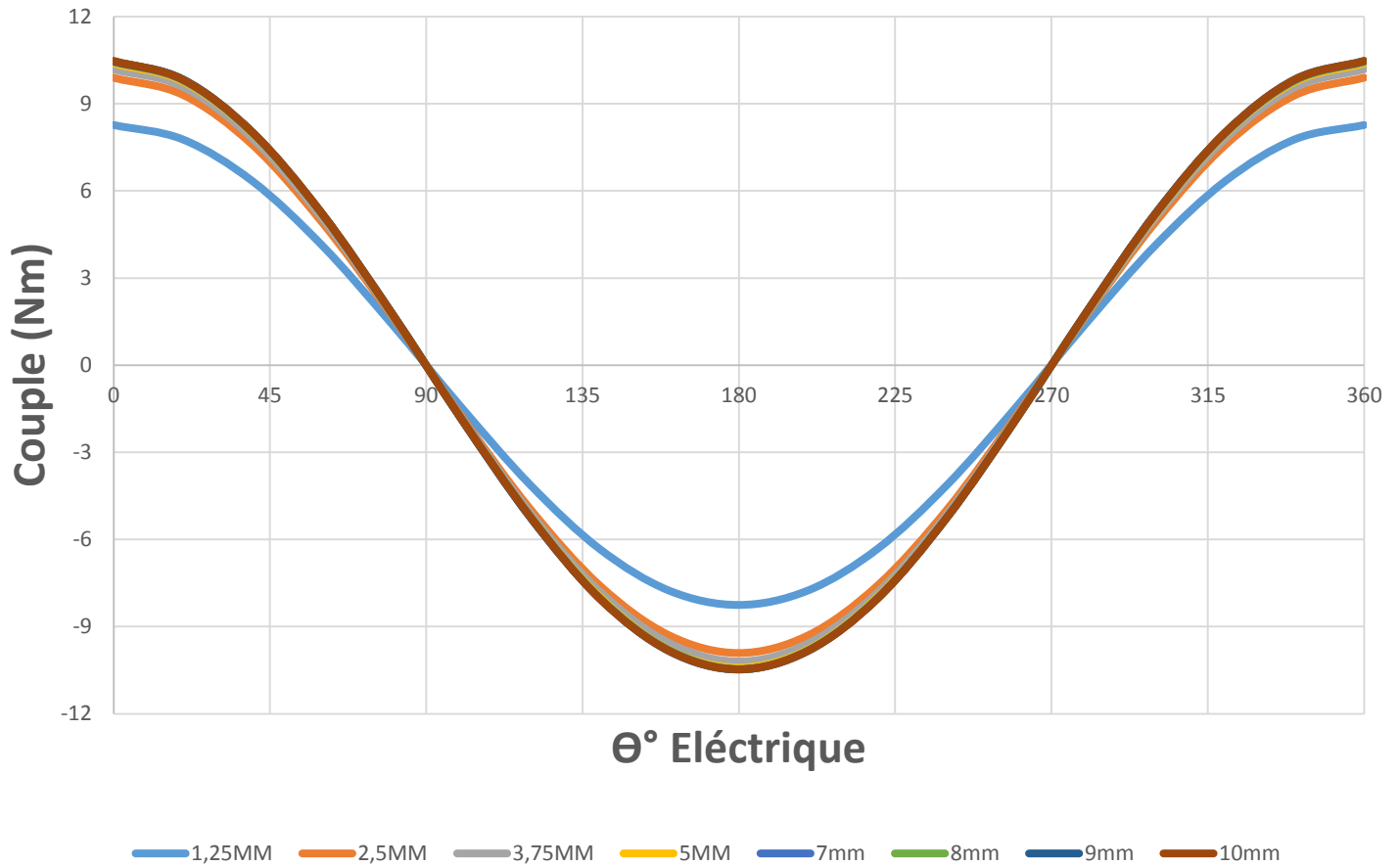


Figure III. 11 Influence de l'épaisseur des aimants permanents du rotor externe sur le couple exercé sur le rotor externe

à

$h_{re1}=1.25\text{mm}$ ,  $h_{re2}=2.5\text{mm}$ ,  $h_{re3}=3.75\text{mm}$ ,  $h_{re4}=5\text{mm}$ ,  $h_{re5}=7\text{mm}$ ,  $h_{re6}=8\text{mm}$ ,  $h_{re7}=9\text{mm}$ ,  $h_{re8}=10\text{mm}$

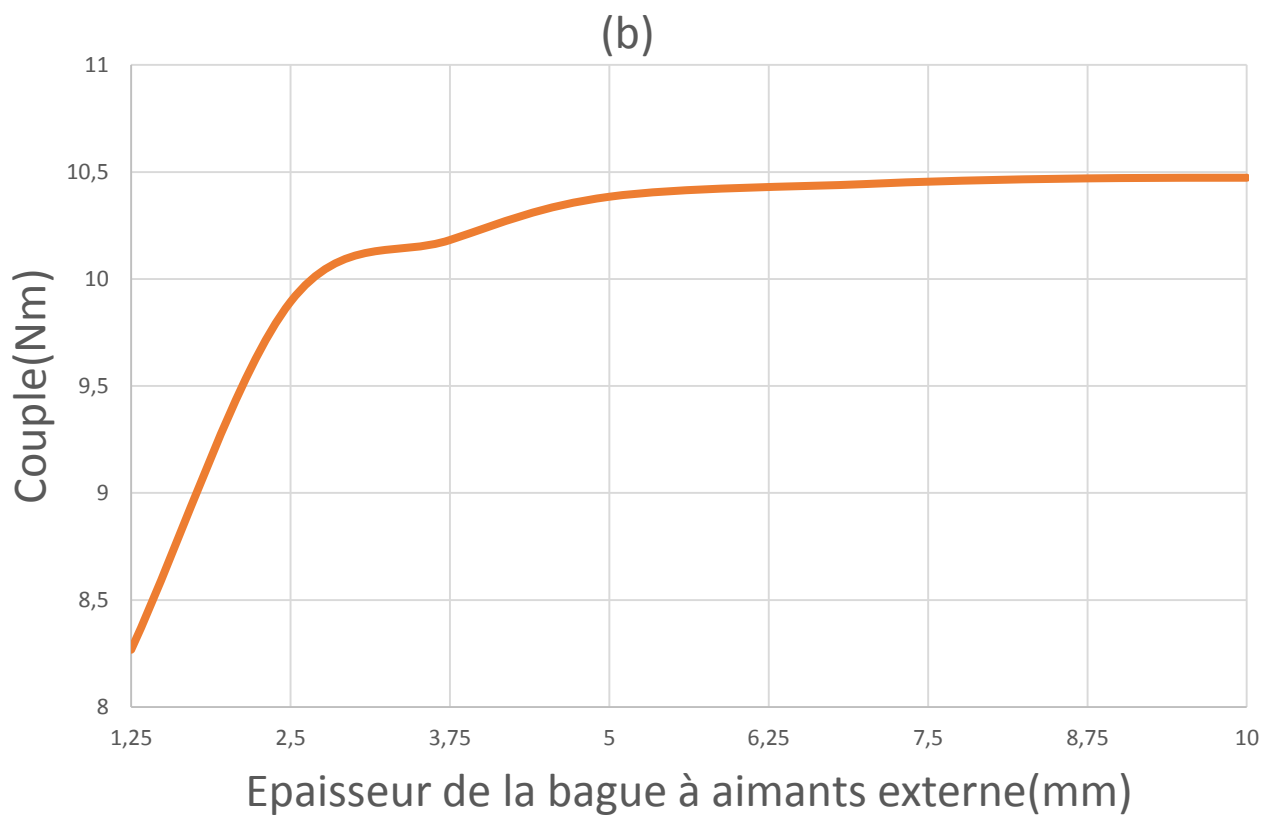
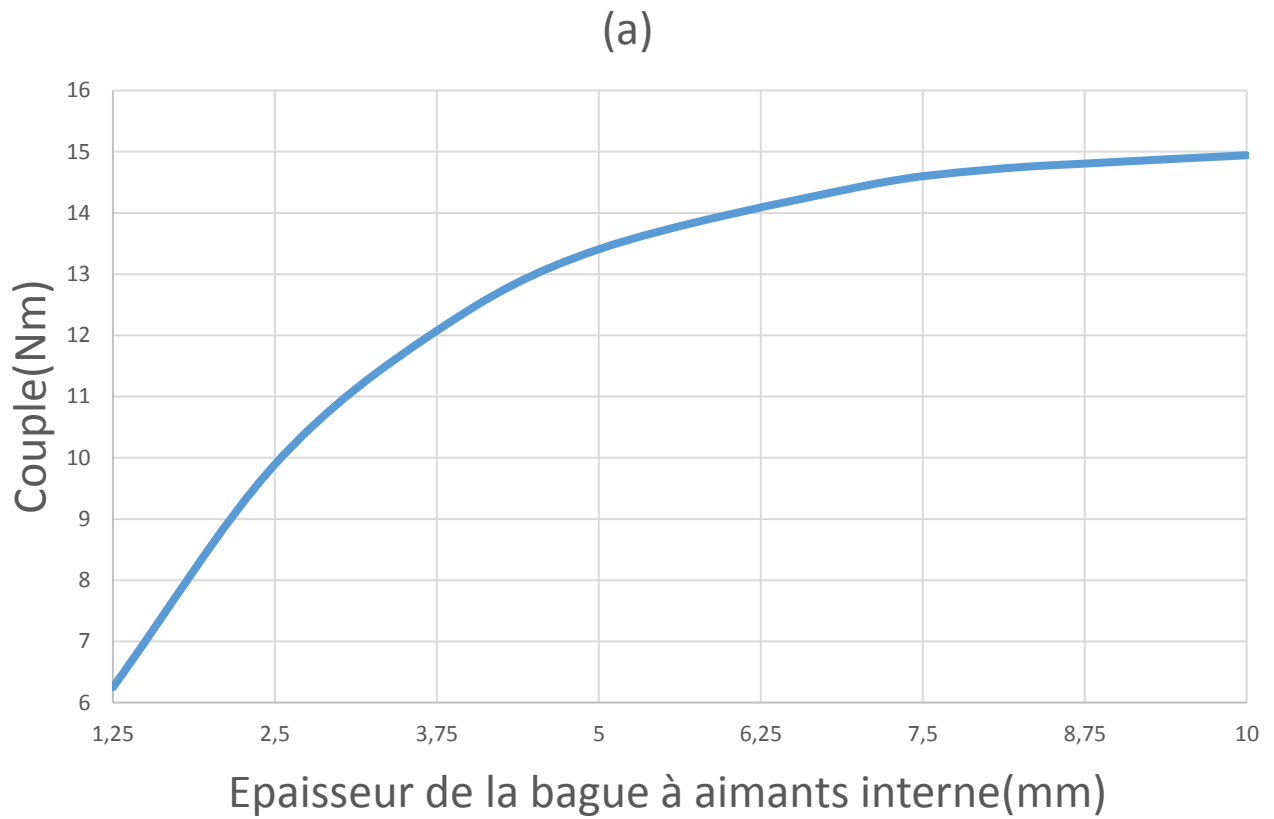


Figure III. 12 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux bagues à aimants interne (a) et externe (b) vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe

D'après la figure de dessus l'influence de l'épaisseur des bagues à aimants interne et externe est claire, Pour commencer on a gardé  $h_{re}$  constant et égale à 2.5mm tout en variant  $h_{ri}$  de 1.25mm à 5mm, le couple à la sortie lui passe de 6.25Nm à 13.40Nm. Ensuite on a fixé la valeur de l'épaisseur des aimants permanents du rotor interne  $h_{ri}$  et avons fait varier la valeur de l'épaisseur des aimants permanents du rotor externe  $E_{re}$  de 1.25mm à 5mm, le couple à la sortie lui par contre varie entre 8.26Nm à 10.38Nm.

D'après les résultats obtenus au cours des simulations précédentes on peut conclure qu'en augmentant l'épaisseur des aimants qu'ils soient interne ou externe, ça aboutie toujours à l'augmentation du couple à la sortie, mais en observant la figure III.12, la bague à aimants interne joue un rôle plus important par rapport à la bague à aimants externe dans la valeur du couple à la sortie.

### III.6.2 Effets des entrefers sur le couple

Dans cette partie nous étudierons l'influence de la variation des entrefers aux niveaux des rotors interne et externe respectivement, on a choisi une plage de valeurs qui varie de 1.25mm à 3.125mm qu'ils soient de l'épaisseur de l'entrefer interne  $e_i$  ou externe  $e_e$ , ou nous avons obtenus les figures III.13 et III.14 respectivement

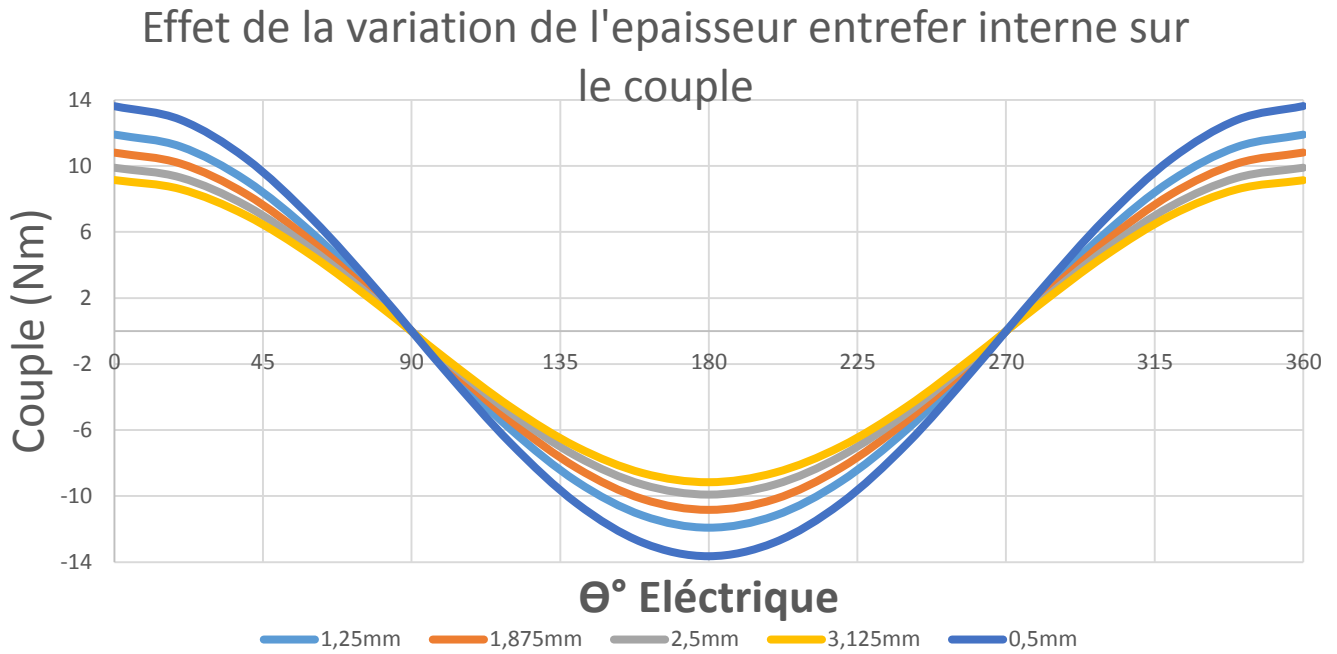


Figure III. 13 Influence de l'épaisseur de l'entrefer interne sur le couple exercé sur le rotor externe à  $e_{i1} = 1.25 \text{ mm}$ ,  $e_{i2} = 1.875 \text{ mm}$ ,  $e_{i3} = 2.5 \text{ mm}$ ,  $e_{i4} = 3.125 \text{ mm}$ ,  $e_{i5} = 0.5 \text{ mm}$

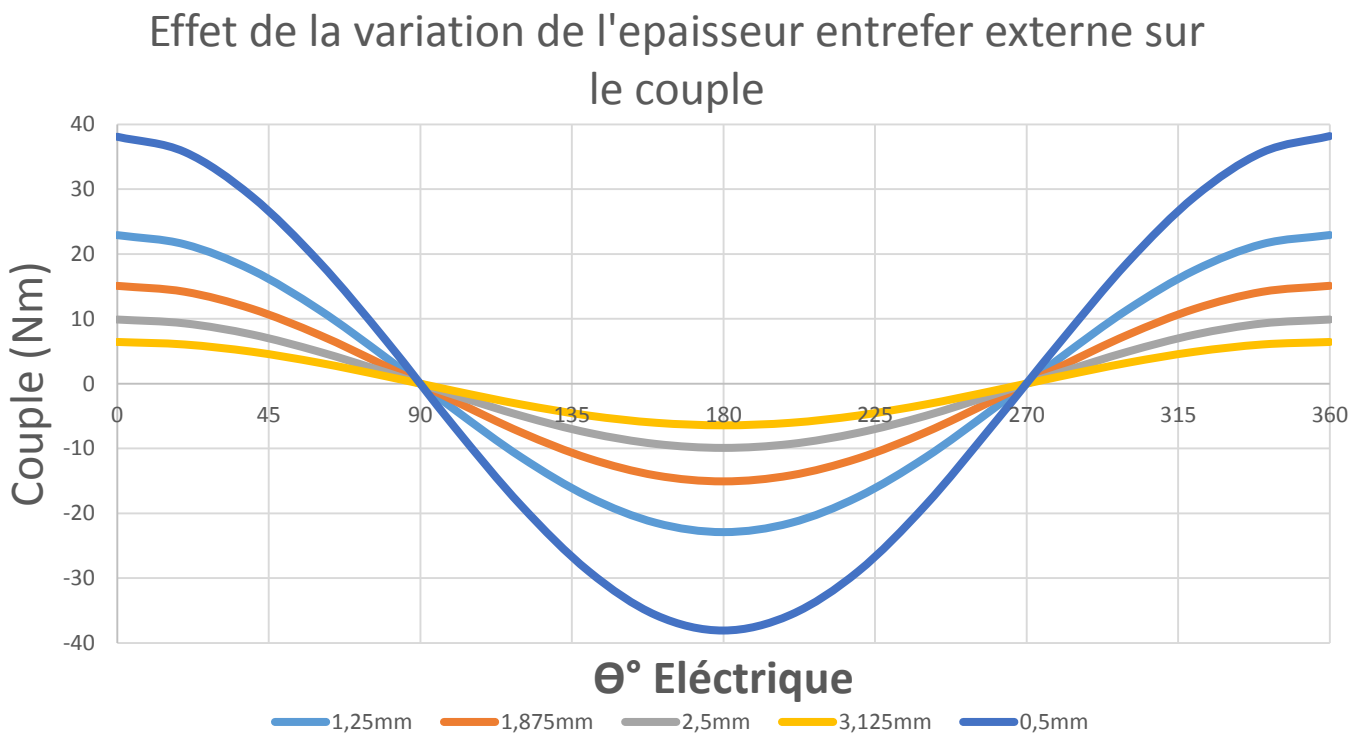


Figure III. 14 Influence de l'épaisseur de l'entrefer externe sur le couple exercé sur le rotor externe à  $e_e1 = 1.25 \text{ mm}$ ,  $e_e2 = 1.875 \text{ mm}$ ,  $e_e3 = 2.5 \text{ mm}$ ,  $e_e4 = 3.125 \text{ mm}$ ,  $e_e5 = 0.5 \text{ mm}$

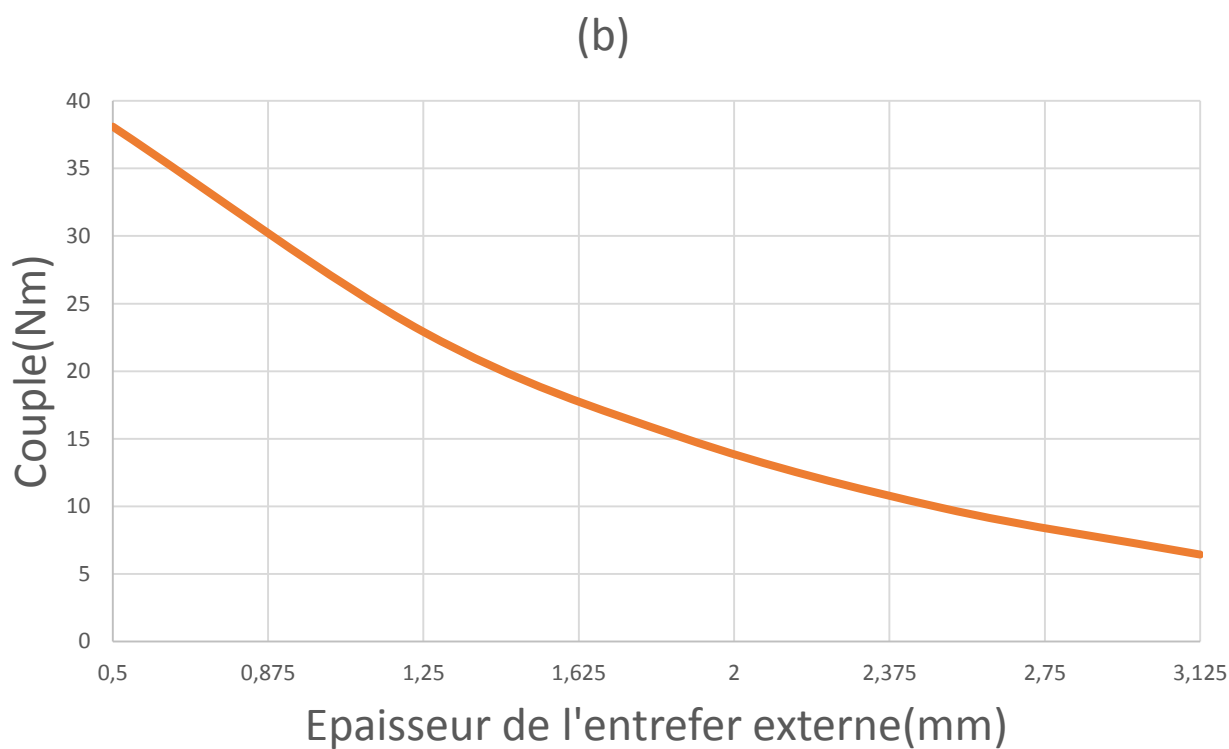
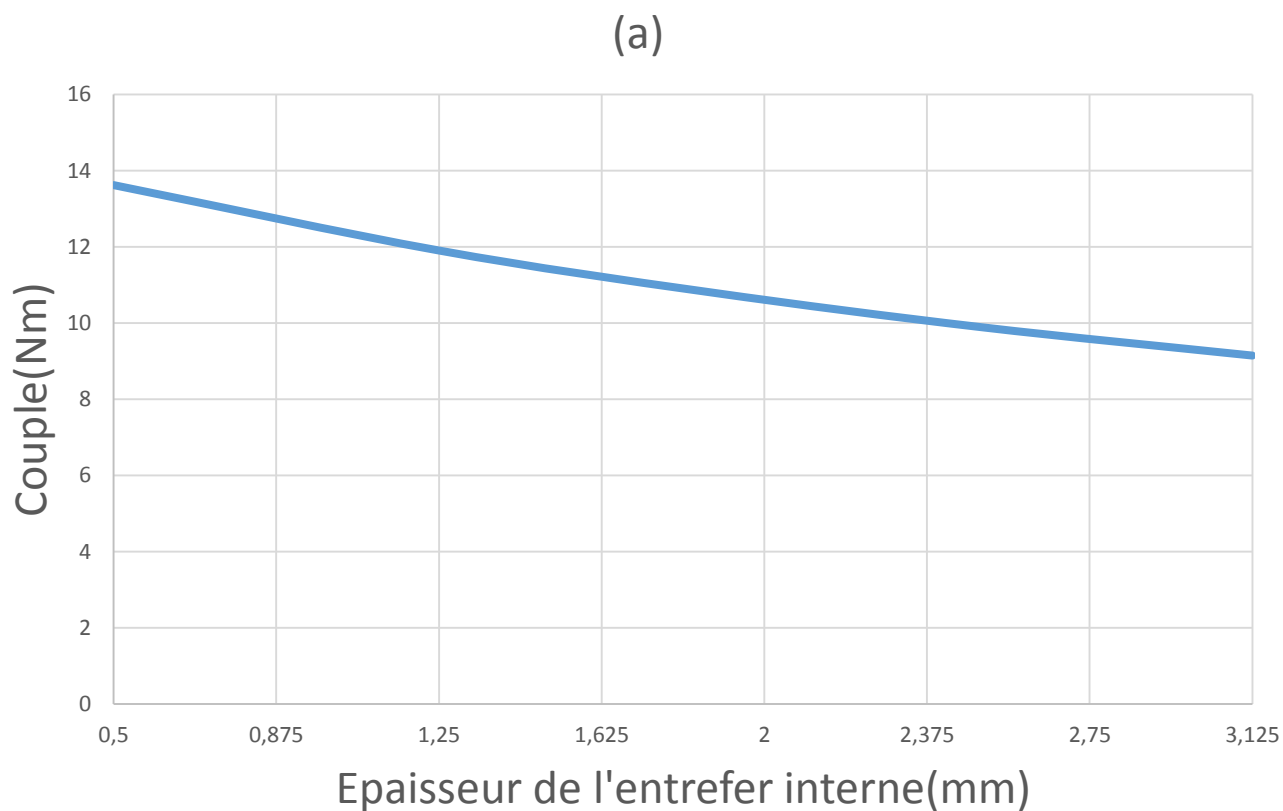


Figure III. 15 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux entrefers interne et externe vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe

Premièrement, pour la figure III.13 on a fixé l'épaisseur de l'entrefer externe  $e_e$  à 2.5mm et en variant l'épaisseur de l'entrefer interne  $e_i$  de 1.25mm à 3.125 mm le couple exercé sur le rotor externe lui subit une diminution de 11.09 Nm à 9.15 Nm. Deuxièmement, pour la figure III.14 on a fixé le  $e_i$  à 2.5mm et on varie le  $e_e$  de 1.25mm à 3.125mm le couple lui par contre passe de 22.9 Nm à 6.4 Nm. L'augmentation de l'entrefer réduit le couple.

En effet l'influence de la variation des épaisseurs des deux l'entrefer interne et externe est facile à distinguer. En augmentant l'épaisseur d'entrefer interne  $e_i$  et externe  $e_e$  ça résulte une diminution du couple, car en augmentant l'entrefer alors la réluctance dans celui-ci augmente aussi, c'est la raison pour laquelle le couple diminue.

En se basant sur la figure III.15, pour avoir un bon couple il est préférable de faire les ajustements du côté de l'entrefer interne car la valeur du couple est sensible beaucoup mieux dans celui-ci. Prenons un exemple dans la figure III.15, pour  $e_i = 0.5mm$  on a eu un couple qui est de 13.62 Nm, alors que pour la même valeur d'épaisseur dans l'entrefer externe  $e_e = 0.5mm$  on a eu a couple de 39.09Nm.

### III.6.3 Influence de la nature des aimants

Afin de voir les effets des aimants sur le couple de sortie on a changé le néodyme 40MGOe avec une perméabilité relative  $\mu_r = 1.049$  par des aimants de samarium-cobalt (SmCo) qui lui a une perméabilité relative  $\mu_r = 1.103$ .

Après avoir refait toute les précédents essais nous avons obtenus les courbes suivantes :

## a. Effets des bagues à aimants sur le couple

## Effet de la variation de l'épaisseur de la bague à aimants externe sur le couple

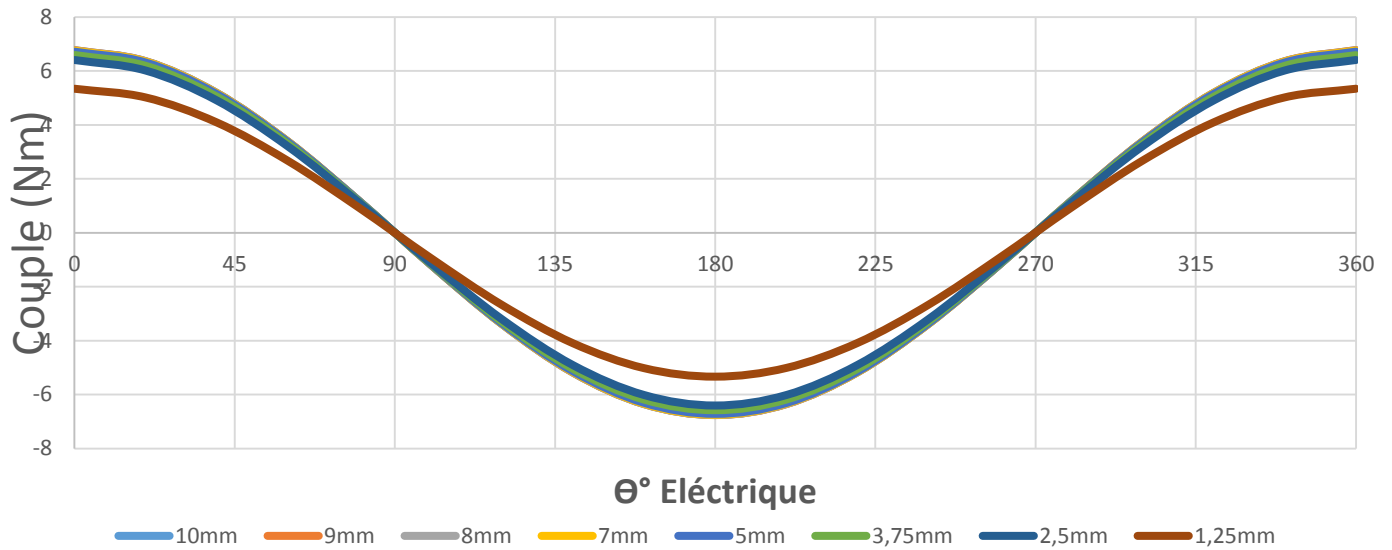


Figure III. 17 Influence de l'épaisseur des aimants permanents (SmCo) du rotor externe sur le couple exercé sur le rotor externe à

$h_{re1}=1.25\text{mm}$ ,  $h_{re2}=2.5\text{mm}$ ,  $h_{re3}=3.75\text{mm}$ ,  $h_{re4}=5\text{mm}$ ,  $h_{re5}=7\text{mm}$ ,  $h_{re6}=8\text{mm}$ ,  $h_{re7}=9\text{mm}$ ,  $h_{re8}=10\text{mm}$

## Effet de la variation de l'épaisseur de la bague à aimants interne sur le couple

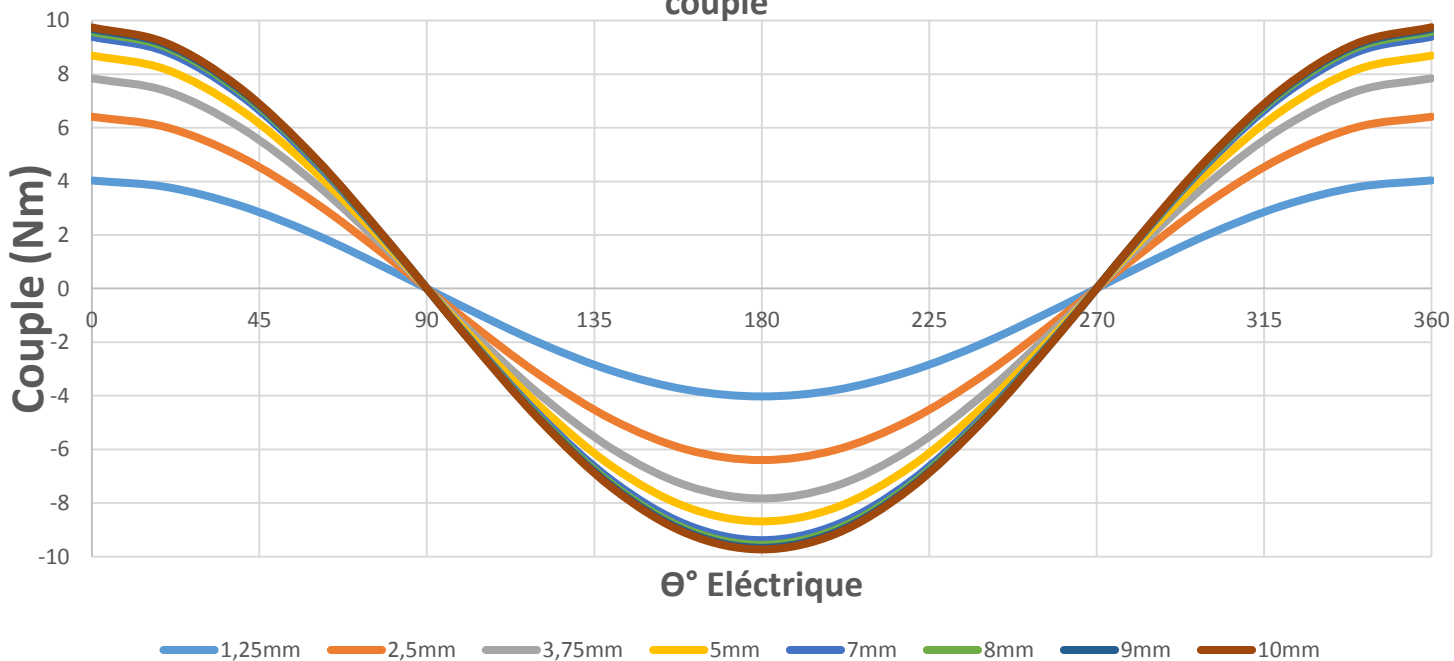


Figure III. 16 Influence de l'épaisseur des aimants permanents (SmCo) du rotor interne sur le couple exercé sur le rotor externe à

$h_{ri1}=1.25\text{mm}$ ,  $h_{ri2}=2.5\text{mm}$ ,  $h_{ri3}=3.75\text{mm}$ ,  $h_{ri4}=5\text{mm}$ ,  $h_{ri5}=7\text{mm}$ ,  $h_{ri6}=8\text{mm}$ ,  $h_{ri7}=9\text{mm}$ ,  $h_{ri8}=10\text{mm}$

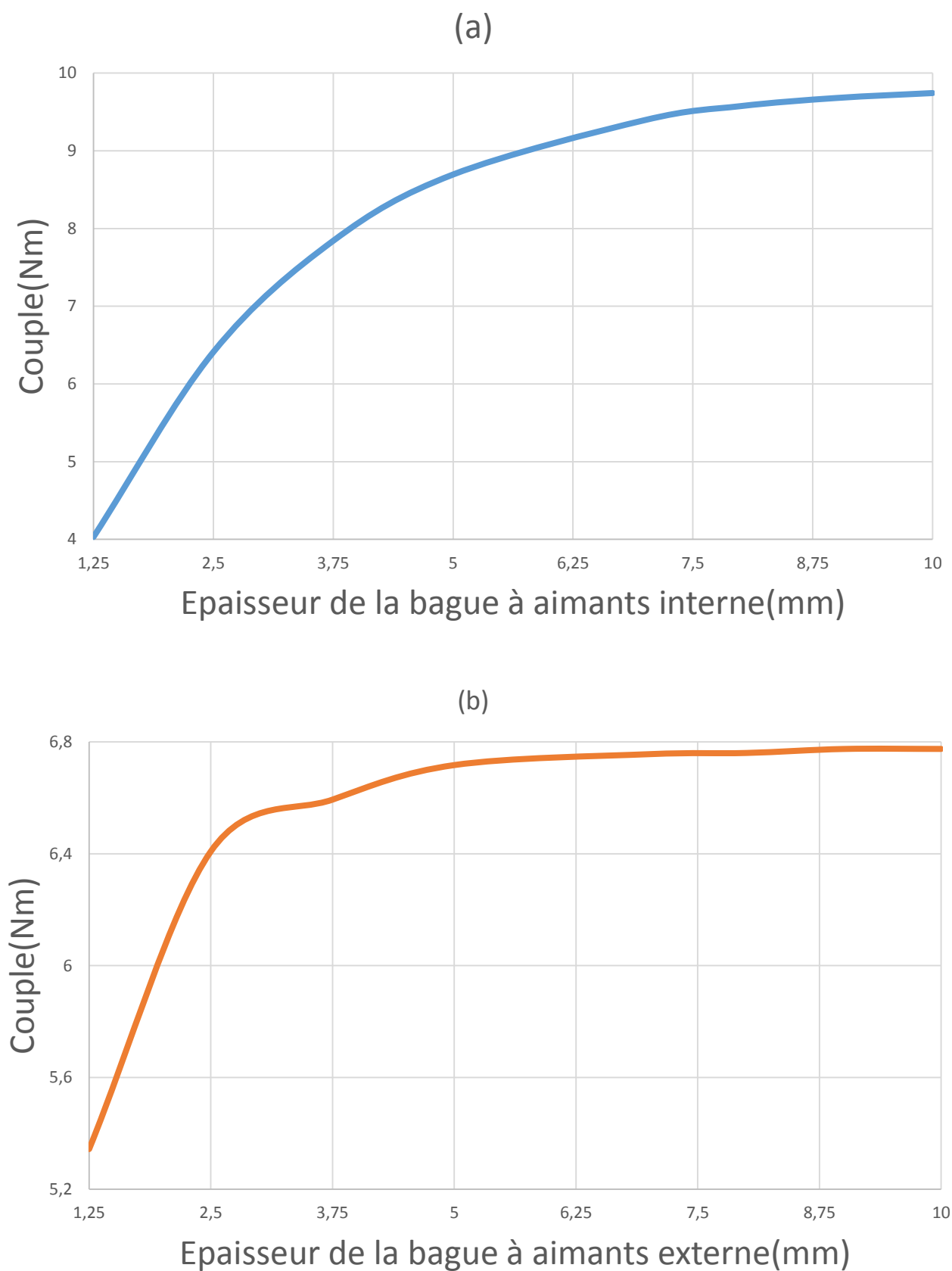


Figure III. 18 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux bagues à aimants interne et externe vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe (SmCo)



## b. Effets des entrefers sur le couple

## Effet de la variation de l'épaisseur entrefer interne sur le couple

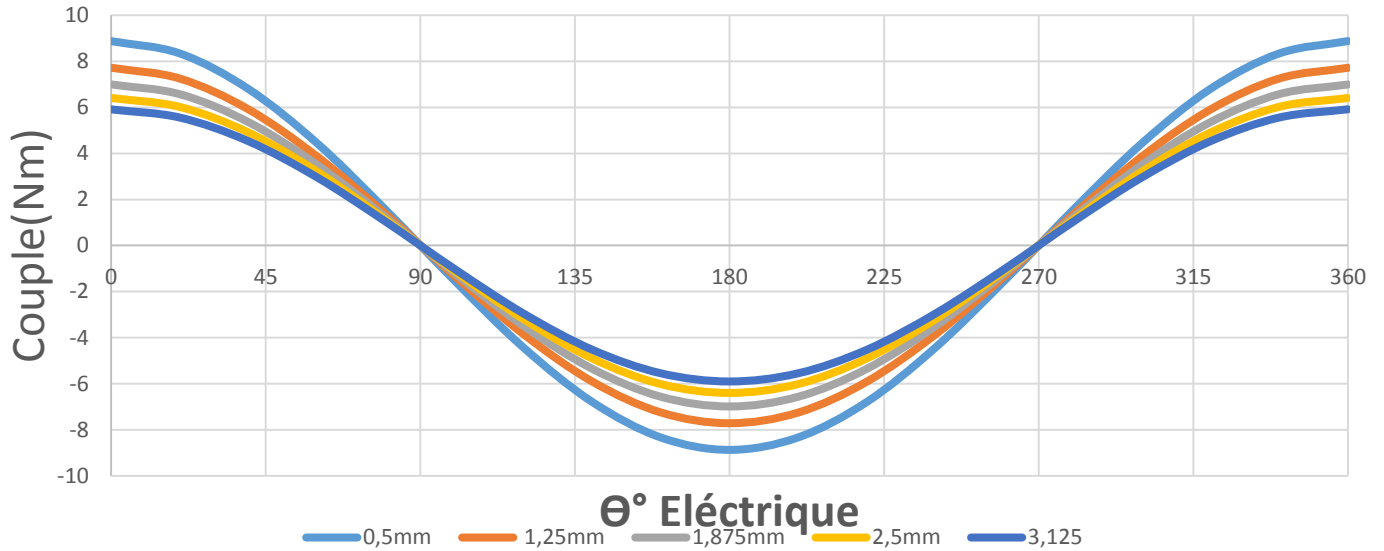


Figure III. 19 Influence de l'épaisseur de l'entrefer interne sur le couple exercé sur le rotor externe (SmCo) à  $e_{i1} = 1.25$  mm,  $e_{i2} = 1.875$  mm,  $e_{i3} = 2.5$  mm,  $e_{i4} = 3.125$  mm,  $e_{i5} = 0.5$  mm

## Effet de la variation de l'épaisseur entrefer externe sur le couple

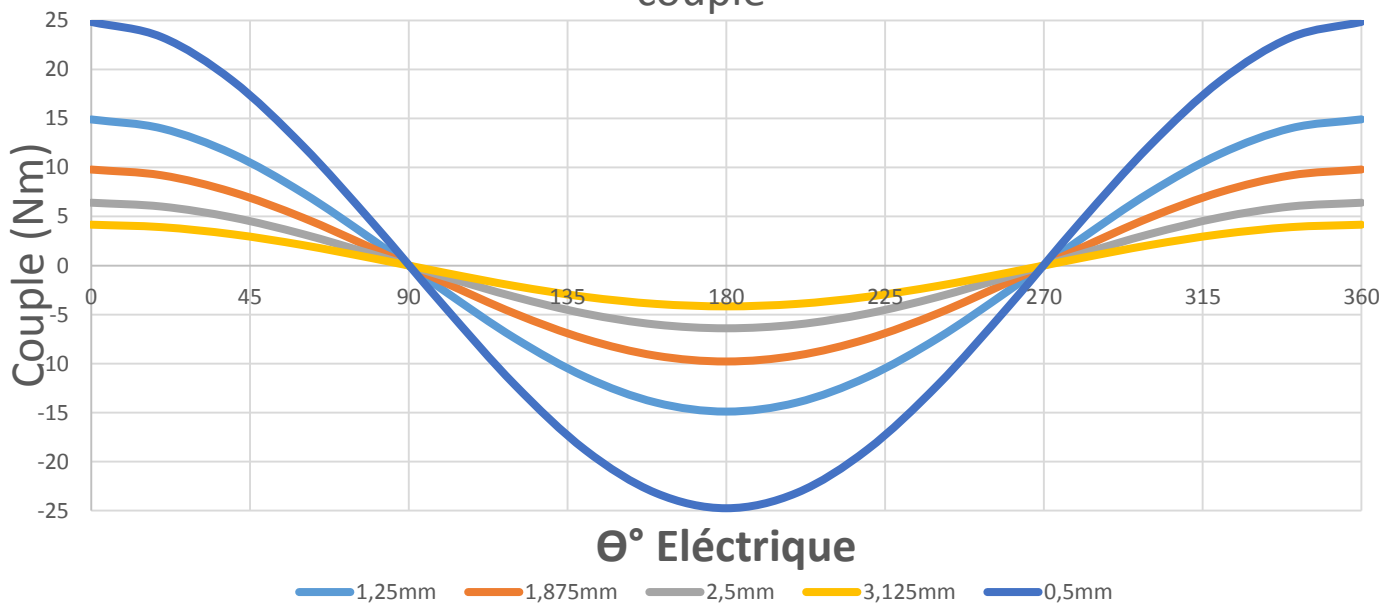


Figure III. 20 Influence de l'épaisseur de l'entrefer externe sur le couple exercé sur le rotor externe (SmCo) à  $e_{e1} = 1.25$  mm,  $e_{e2} = 1.875$  mm,  $e_{e3} = 2.5$  mm,  $e_{e4} = 3.125$  mm,  $e_{e5} = 0.5$  mm

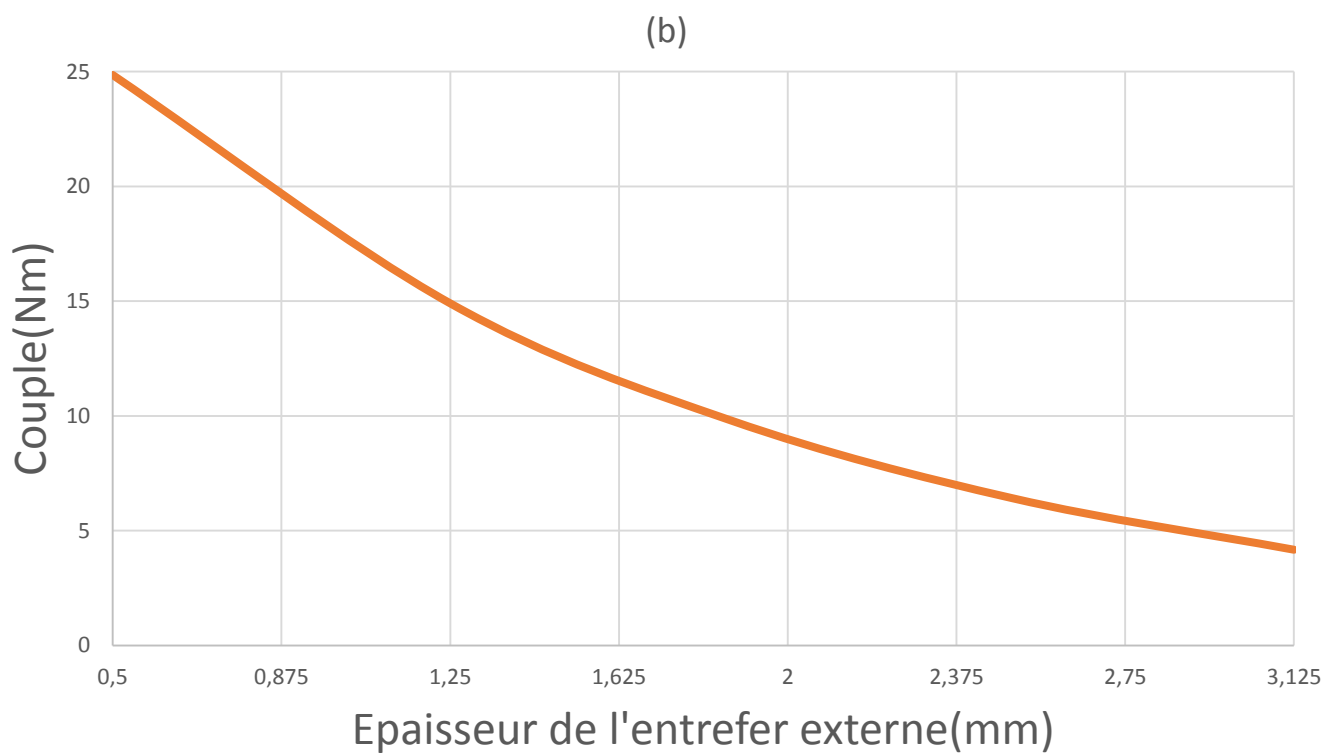
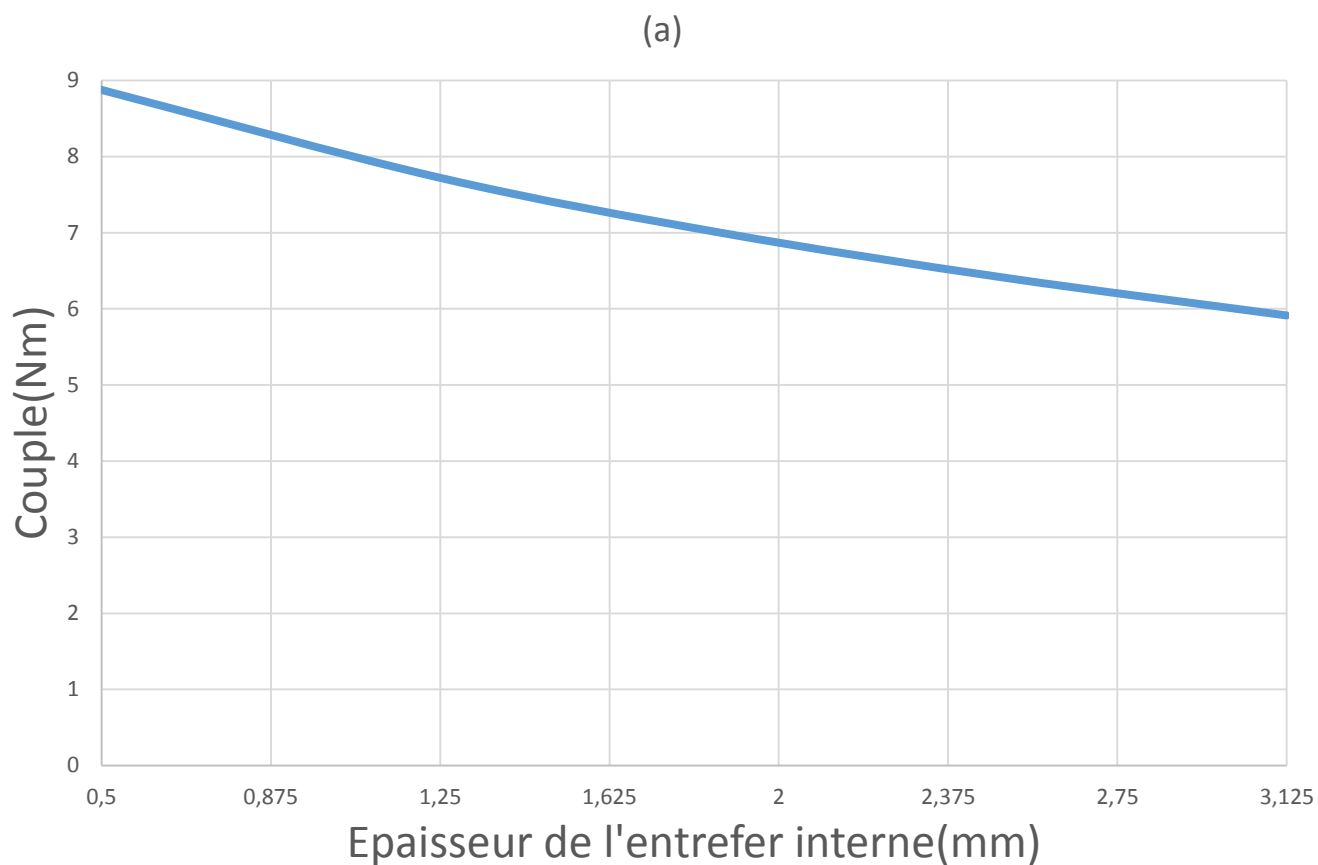


Figure III. 21 Caractérisation de la variation des épaisseurs des deux entrefers interne et externe vis-à-vis le couple exercé sur le rotor externe (SmCo)

### III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre on vient de confirmer tout ce qui a été déjà dit dans les précédentes études de ce type d'engrenage dit engrenage magnétique concentrique.

On est arrivé à la conclusion que pour transmettre les couples à une grande valeur (élevée) il faut prendre en considération plusieurs facteurs à ajuster afin d'aboutir à un résultat souhaité.

Comme démontré dans ce chapitre on est arrivé aux résultats que pour avoir un couple élevé, il est préférable de faire des ajustements sur les paramètres de dimensionnements de notre engrenage magnétique. Comme on a fait dans la partie III.6.1 et III.6.2 de ce chapitre III, on a prouvé que pour aboutir à un couple élevé alors on doit ajuster l'épaisseur de la bague à aimants interne et l'entrefer externe que de toucher à d'autres paramètres, car ces deux paramètres eux réagissent beaucoup mieux vis-à-vis du couple de sortie (couple exercé sur le rotor externe).

Cette étude paramétrique à démontrée que pour l'obtention d'une meilleure transmission du couple possible alors on doit choisir une épaisseur de bague à aimants interne plus épaisse et un entrefer externe plus petit possible.

Dans la partie III.6.3, le changement des aimants en passant de NdFeB 40MGOe à SmCo 27MGOe nous a montré l'influence qu'apporte le choix des aimants. Comme on peut le voir sur les différentes figures (de la figure III.16 jusqu'à III.21), la forme des courbes sont identiques à celles de néodyme (NdFeB), mais les amplitudes quant à elles ont changés. Les résultats obtenus en utilisant le néodyme sont plus importants, car il a de meilleures propriétés magnétiques.

Il est donc très important de prendre en compte l'intégralité de ces facteurs lors de la sélection des aimants répondant à un besoin précis.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude, l'optimisation et la réalisation d'une transmission magnétique concentrique. Nous nous sommes posé beaucoup de questions sur la possibilité de remplacer l'engrenage mécanique par un engrenage magnétique, parmi elles : est-ce que la formule de WILLIS est valable pour l'engrenage magnétique et est-ce que les engrenages magnétiques ont des performances intéressantes ?

Afin d'y répondre, il nous a semblé nécessaire de mener dans un premier temps une étude complète sur les engrenages mécaniques. On a donc examiné le fonctionnement et le dimensionnement des trains épicycloïdaux mécaniques. La cinématique de ce train fait appel à la formule de Willis que l'on a écrite pour différents modes de fonctionnement.

La partie la plus importante de notre projet de fin d'études a concerné donc l'étude de l'engrenage magnétique concentrique. Un état de l'art le concernant a été dressé et différentes topologies ont été présentées. Parmi les structures existantes, nous avons choisi d'étudier la topologie à flux radial avec aimants permanents montés en surface. L'étude des harmoniques d'espace de l'induction d'entrefer a montré que l'équation de WILLIS de l'engrenage mécanique est également valable pour le cas du magnétique donc ce dernier peut fonctionner de la même manière. Ainsi, on peut obtenir tous les modes de fonctionnement et les équations comme pour les engrenages mécaniques. Une étude paramétrique a montré qu'il existe un couple maximal. Nous avons donné les règles qui permettent d'obtenir un couple maximal à la sortie (Couple exercé sur le rotor externe).

En utilisant le logiciel FEMM et le langage LUA ça nous a permis de faire des calculs qui sont difficiles à réaliser analytiquement, ces outils d'analyse nous ont aidé à obtenir des résultats plus précis.

Dans la plupart des domaines d'applications des engrenages actuelle, il est impératif d'assurer une transmission garantie sans pertes de puissance. En effet les engrenages magnétiques sont connus pour leurs rendements qui sont très élevés, ils assurent aussi une sécurité tout autant pour l'environnement que pour le facteur humain.

C'est pourquoi de plus en plus les accouplements magnétiques sont utilisés afin de répondre de façon optimale aux exigences du monde actuel. Avec ce genre d'accouplements, la transmission de forts couples est parfaitement réalisée, et ça, sans aucune usure.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [ATA01] **K. Atallah and D. Howe**, “A Novel High-Performance Magnetic Gear”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 2844–2846, July 2001.
- [ATA04] **K. Atallah, S.D. Calverley and D. Howe**, “Design, Analysis and Realisation of a High Performance Magnetic Gear”, IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 151, No. 2, pp. 135-143, March 2004.
- [AN16] **A. Neuland**, “Apparatus for transmitting power,” US Patent 117 1351, 1916.
- [AH4] **S. C. K. Atallah and D. Howe**, “High-performance magnetic gears,” Journal of Magnetism and Magnetic Materials, pp. 272–276, 2004.
- [AH5] **J. W. K. Atallah and D. Howe**, “A high-performance linear magnetic gear,” JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 97, vol. 10N516, 2005.
- [ACH8] **R. C. J. R. K. Atallah, S. Calverley and D. Howe**, “A new pm machine topology for low-speed, high-torque drives,” in Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008.
- [ARH8] **S. M. K. Atallah, J. Rens and D. Howe**, “A novel "pseudo" direct-drive brushless permanent magnet machine,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 55, no. 11, pp. 4349–4352, 2008.
- [ABC13] **Vedanadam M. Acharya, Jonathan Z. Bird, and Matthew Calvin**, “A Flux Focusing Axial Magnetic Gear,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 49, NO. 7, JULY 2013.
- [B66] **M. Baermann**, “Permanent magnet device for generating electrical energy,” US Patent 3 273 001, 1966.
- [BBVA14] **Walter Bomela, Jonathan Z. Bird, and Vedanadam M. Acharya**, “The Performance of a Transverse Flux Magnetic Gear” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 1, JANUARY 2014.
- [CA01] **C. Armstrong** “power transmitting device” US patent 687 292, 1901.
- [C55] **J. Cluwen**, “Magnetic circuits and devices,” US Patent 2 722 617, 1955.
- [CZZ7] **J. J. C. L. K.T. Chau, D. Zhang and Y. Zhang**, “Design of a magnetic-g geared outer-rotor permanent magnet brushless motor for electric vehicles,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 43, pp. 2504–2506, 2007.
- [CCLL14] **Mu Chen, K. T. Chau, Wenlong Li, and Chunhua Liu**, “Cost-Effectiveness Comparison of Coaxial Magnetic Gears with Different Magnet Materials” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 2, FEBRUARY 2014.
- [CNLHL14] **Yiduan Chen, Wei Nong Fu, Siu Lau Ho, and Huijuan Liu**, “A Quantitative Comparison Analysis of Radial-Flux, Transverse-Flux, and AxialFlux Magnetic Gears” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 11, NOVEMBER 2014.

- [CHA99B] **J. F. Charpentier and G. Lemarquand**, "Study of Permanent magnet Couplings with Progressive Magnetization Using an Analytical Formulation," IEEE Trans on Mag, Vol 35, n°5, p. 4206 – 4217, Sept 99.
- [CAN08] **A. Canova and F. Cavalli**, "Design Procedure for Hysteresis Couplers," IEEE Trans on Magn., vol. 44, no. 10, pp. 2381- 2395, October 2008.
- [DJ8] **Y. Z. S. Du and J. Jiang**, "Research on a novel combined permanent magnet electrical machine," in International Conference of Electrical Machines and Systems, ICEMS, 2008.
- [DW8] **M.W. K. Davey and G. Wedeking**, "Magnetic gears - an essential enabler for the next generation's electromechanical drives," in ELECTRICAL MACHINES TECHNOLOGY SYMPOSIUM, (EMTS), 2008.
- [DEX] **Dexter Magnetic Technologies**, <http://www.dextermag.com/products/magnetic-assemblies/couplings>.
- [FT9] **N. Frank and H. Toliyat**, "Gearing ratios of a magnetic gear for marine applications," in IEEE Electric Ship Technologies Symposium, ESTS. 2009.
- [FT9\*] **N. Frank and H. Toliyat**, "Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines," in IEEE International Electrical Machines and Drives Conference, IEMDC'09. 2009.
- [FH10] **W. Fu and S. Ho**, "A quantitative comparative analysis of a novel flux modulated permanent magnet motor for low-speed drive," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 46, pp. 127–134, 2010.
- [FON09] **J. Fontchastagner, Y Lefèvre, et F. Messine**, "Some co-axial magnetic couplings designed using an analytical model and an exact global optimization code," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 3, pp. 1458–1461, Mar. 2009.
- [FRK11]: **Frank, W.N.**; Analysis of the Concentric Planetary Magnetic Gear. Texas A&M University. 2011
- [FEM16]: **Meeker, D. C.**, "Finite element method magnetics, version 4.2" (12 Janvier 2016 build), available at: <http://www.femm.info>.
- [GA] **Karl-Heinrick Grote, Erik. Antonsson**, "Mechanical engineering," hand book of springer, volume 10.
- [HF41] **H. Faus**, "Magnet gearing" US Patent 2243 555, 1941.
- [HTDL8] **C.C. Huang, M.C. Tsai, D.G. Dorrell, and B.J. Lin**, "Development of a magnetic planetary gearbox," IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 3, pp. 403-412, Mar. 2008.
- [H51] **H. Hurvitz**, "Magnetic gearing system," US Patent 2 548 373, 1951.
- [HT80] **D. Hesmondhalgh and D. Tipping**, "A multielement magnetic gear," IEEE PROCEEDINGS, vol. 127, 1980.



- [HR7]** **A. B. W. Hafla and W. Rucker**, “Efficient design analysis of a novel magnetic gear on a high performance computer,” *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 712–726, 2007.
- [HER]** [http://www.hermeticumpen.com/system/assets/299/FB\\_SMP\\_API685\\_F.pdf](http://www.hermeticumpen.com/system/assets/299/FB_SMP_API685_F.pdf), document technique en ligne.
- [HF41]** H. Faus, “Magnet gearing” US Patent 2243 555, 1941.
- [HTDL8]** **C.C. Huang, M.C. Tsai, D.G. Dorrell, and B.J. Lin**, “Development of a magnetic planetary gearbox,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 3, pp. 403-412, Mar. 2008.
- [H51]** **H. Hurvitz**, “Magnetic gearing system,” US Patent 2 548 373, 1951.
- [HT80]** **D. Hesmondhalgh and D. Tipping**, “A multielement magnetic gear,” *IEEE PROCEEDINGS*, vol. 127, 1980.
- [HR7]** **A. B. W. Hafla and W. Rucker**, “Efficient design analysis of a novel magnetic gear on a high performance computer,” *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 712–726, 2007.
- [HER]** [http://www.hermeticumpen.com/system/assets/299/FB\\_SMP\\_API685\\_F.pdf](http://www.hermeticumpen.com/system/assets/299/FB_SMP_API685_F.pdf), document technique en ligne.
- [IEEE07]** **K.T. Chau, D. Zhang, J.Z. Jiang, C. Liu, and Y. Zhang**, “Design of a magneticgeared outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 6, pp. 2504-2506, Jun. 2007.
- [IEEE08]** **L. Jian, K.T. Chau, and J.Z. Jiang**, “An integrated magnetic-gear permanent magnet in-wheel motor drive for electric vehicles,” in *Proc. IEEE Conf. VPPC 2008*, Harbin, China, pp. 1-6.
- [ICEMS08]** **S. Du, Y. Zhang, and J. Jiang**, “Research on a novel combined permanent magnet electrical machine,” in *Proc. IEEE Int. Conf. ICEMS 2008*, Wuhan, China, pp. 3564-3567.
- [JCGJYL9]** **L. Jian, K.T. Chau, Y. Gong, J.Z. Jiang, C. Yu, and W. Li**, “Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4526-4529, Oct. 2009.
- [JAR8]** **F.T. Jorgensen, T.O. Andersen, and P.O. Rasmussen**, “The cycloid permanent magnetic gear,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 1659-1665, Nov./Dec. 2008.
- [JJ8]** **K. C. L. Jian and J. Jiang**, “An integrated magnetic-gear permanent-magnet in-wheel motor for electric vehicles,” in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2008.
- [JJ9]** **K. C. L. Jian and J. Jiang**, “A magnetic-gear outer-rotor permanent-magnet brushless machine for wind power generation,” *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 45, no. 3, pp. 954–962, MAY/JUNE 2009.
- [JC9]** **L. Jian and K. Chau**, “Analytical calculation of magnetic field distribution in coaxial magnetic gears,” *Progress in Electromagnetics Research, PIER 92*, pp. 1–16, 2009.

- [JC9\*] **L. Jian and K. Chau**, “Design and analysis of an integrated halbach-magneticgeared permanent magnet motor for electric vehicles,” *Journal of Asian Electric Vehicles*, vol. 7, no. 1, pp. 1213–1219, 2009.
- [KT88] **K. Tsurumoto**, “power transmitting of magnetic gear using common meshing and insensibility to center distance,” *IEEE Translation journal on magnetics in japan*, vol. 3, no. 7, july 1988.
- [K93] **S. Kikuchi**, “Design and characteristics of a new magnetic worm gear using permanent magnet,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 29, no. 6, NOVEMBER 1993.
- [KT94] **S. Kikuchi and K. Tsurumoto**, “Trail construction of a new magnetic skew gear using permanent magnet,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 30, no. 6, NOVEMBER 1994.
- [KHO2] **J.-P. H. Kyung-Ho Ha and Y.-J. Oh**, “Design and characteristic analysis of non-contact magnet gear for conveyor by using permanent magnet,” in *37th IAS Annual Meeting in Industry Applications Conference*, 2002.
- [KG5] **Wang, M.J. Kamper and J. Gieras**, “Optimal design of a coreless stator axial flux permanent-magnet generator,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 41, pp. 55–64, 2005.
- [KTR13] [https://www.ktr.com/root/img/pool/pdf/produktkataloge/fr/fr\\_gesamt/ktr\\_kat00fk00.pdf](https://www.ktr.com/root/img/pool/pdf/produktkataloge/fr/fr_gesamt/ktr_kat00fk00.pdf), document technique en ligne, 2013.
- [LBS85] **R. Lee, E. Brewer and N. Schaffel**, “Processing of Neodymium-Iron-Boron melt-spun ribbons to fully dense magnets,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 21, no. 5, pp. 1958-1963, Sep. 1985.
- [LCJ11] **Wenlong Li, K. T. Chau, and J. Z. Jiang**, “Application of linear magnetic gears for Pseudo-direct-drive oceanic wave energy harvesting” *IEEE transactions on magnetics*, vol.47, no.10, October 2011
- [L72] **N. Laing**, “Magnetic transmission,” US Patent 345 650, 1972.
- [L73] **N. Laing**, “Centrifugal pump with magnetic drive,” US Patent 3 762 839, 1973.
- [LCY9] **J. J. X. Liu, K.T. Chau and C. Yu**, “Design and analysis of interior-magnet outer-rotor concentric magnetic gears,” *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 105, vol. 07f101, 2009.
- [LMR13] **Thierry Lubin, Smail Mezani, and Abderrezak Rezzoug**, “Development of a 2-D Analytical Model for the Electromagnetic Computation of AxialField Magnetic Gears” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 49, NO. 11, NOVEMBER 2013.
- [Lub12] **T. Lubin, S. Mezani, A. Rezzoug**, "Simple analytical expressions for the force and torque of axial magnetic couplings", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 27, pp. 536-546, 2012.

- [MOT] **Marlin O. Thurston**, “Permanent Magnet Motor Technology” Electrical and computer engineering, a series of reference books and text books, second edition.
- [NH13] **Noboru Niguchi and Katsuhiko Hirata**, “Torque-Speed Characteristics Analysis of a Magnetic-Geared Motor Using Finite Element Method Coupled With Vector Control”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 49, NO. 5, MAY 2013.
- [PFT13] **Siavash Pakdelian, Nicolas W. Frank, Hamid A. Toliyat**, “Principles of the Trans-Rotary Magnetic Gear,” IEEE transaction on magnetics, vol. 49, no. 2, February 2013.
- [PFH14] **Shan Peng, W. N. Fu, and S. L. Ho**, “A Novel Triple-Permanent-Magnet-Excited Hybrid-Flux Magnetic Gear and Its Design Method Using 3- D Finite Element Method” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 11, NOVEMBER 2014.
- [RR10] **A. Ragheb and M. Ragheb**, “Wind turbine gearbox technologies,” in Proceedings of the 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC10), 2010.
- [RJM9] **H. T. H. M. P.O. Rasmussen, T.M. Jahns and T. Matzen**, “Motor integrated permanent magnet gear with a wide torque-speed range,” in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE., 2009.
- [RM8] **A. Reinap and F. Marquez**, “Development of a modular linear magnetic gear as a project in the electrical engineering education,” in Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008.
- [RAH7] **S. C. J. Rens, K. Atallah and D. Howe**, “A novel magnetic harmonic gear,” in IEEE International Electric Machines & Drives Conference IEMDC '07, 2007.
- [R70] **S. Rand, S. Rand**, “Magnetic transmission system,” US Patent 3 523 204, 1970.
- [R67] **G. Reese**, “Magnetic gearing arrangement,” US Patent 3 301 091, 1967.
- [RCCA10] **J. Rens, R. Clark, S. Calverley, K. Atallah, and D. Howe**, “A novel magnetic harmonic gear,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, no. 1, pp. 206-212, Jan./Feb. 2010.
- [RAN3] **F. J. P.O. Rasmussen, T.O. Anderson and O. Nielsen**, “Development of a high performance magnetic gear,” in Conference Record of the 38th IAS Annual Meeting in Industry Applications, vol. 3, 2003.
- [SCW7] **L. Shah, A. Cruden, and B. W. Williams**, “A magnetic gear box for application with a contra-rotating tidal turbine,” in Proc. IEEE 7th Int. Conf. PEDS 2007, Bangkok, Thailand, pp. 989-993.
- [T89] **K. Tsurumoto**, “Some consideration on the improvement of performance characteristics of magnetic gear,” IEEE TRANSACTION JOURNAL ON MAGNETICS IN JAPAN, vol. 4, no. 9, SEPTEMBER 1989.
- [T89] **K. Tsurumoto**, “Some consideration on the improvement of performance characteristics of magnetic gear,” IEEE TRANSACTION JOURNAL ON MAGNETICS IN JAPAN, vol. 4, no. 9, SEPTEMBER 1989.

- [T91] **K. Tsurumoto**, “Generating mechanism of magnetic force in meshing area of magnetic gear using permanent magnet,” IEEE TRANSACTION JOURNAL ON MAGNETICS IN JAPAN, vol. 6, no. 6, JUNE 1991.
- [T92] **K. Tsurumoto**, “Basic analysis on transmitted force of magnetic gear using permanent magnet,” IEEE TRANSACTION JOURNAL ON MAGNETICS IN JAPAN, vol. 7, no. 6, 1992.
- [TTO2] **N. T. K. Tsurumoto, S. Togo and S. Okano**, “Characteristics of the magnetic gear using a bulk high temperature superconductor,” IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, vol. 12, no. 1, MARCH 2002.
- [TK87] **K. Tsurumoto and S. Kikuchi**, “A new magnetic gear using permanent magnet,” IEEE Tran. Magn., vol. 23, no. 5, pp. 3622-3624, Sept. 1987.
- [TR] <http://newgentransp.e-monsite.com/pages/transports-ferroviaires/train-a-levitation-magnetique.html>
- [TVZ19] **T. V. Zweigbergk**, “Electric change speed gearing for automobiles,” US Patent 1292 218, 1919.
- [UBBC14] **Krishna K. Uppalapati, Walter B. Bomela, Jonathan Z. Bird, Matthew D. Calvin**, “Experimental Evaluation of Low-Speed Flux-Focusing Magnetic Gearboxes” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 50, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2014.
- [WA9] **J. Wang and K. Atallah**, “Modeling and control of „pseudo“ direct-drive brushless permanent magnet machines,” in Proc. IEEE Int. Conf. IEMDC 2009, Miami, FL, pp. 870-875.
- [WSW8] **Y.W. L.L.Wang, J.X. Shen and K.Wang**, “A novel magnetic-g geared outer rotor permanent-magnet brushless motor,” Power Electronics, Machines and Drives, PEMD, pp. 33–36, 2008.
- [WSH9] **P. L.W. F. C.W. L.L.Wang, J.X. Shen and H. Hao**, “Development of a magnetic-g geared permanent magnet brushless motor,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 45, no. 10, pp. 4578–4581, OCTOBER 2009.
- [WIKI1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_coupling](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_coupling).
- [WIL41]: **R. Willis**, “Principles of Mechanism”, Parker, London, 1841.
- [YJKY8] **L. Yong, X. Jingwei, P. Kerong, and L. Yongping**, “Principle and simulation analysis of a novel structure magnetic gear,” in Proc. IEEE Int. Conf. ICEMS 2008, Wuhan, China, pp. 3845-3849.
- [YHY96] **C. H. D. C. S. W. Y.D. Yao, D.R. Haung and T. Ying**, “The radial magnetic coupling studies of perpendicular magnetic gears,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 32, no. 5, 1996.

**[YHW96] S. L. Y.D. Yao, D.R. Haung and S. Wang**, “Theoretical computations of the magnetic coupling between magnetic gears,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 32, no. 3, MAY 1996.

**[YHY97] C. L. S. W. D. C. Y.D. Yao, D.R. Huang and T. Ying**, “Magnetic coupling studies between radial magnetic gears,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 33, no. 5, SEPTEMBER 1997.

**[YHW97] Y.D. Yao, D.R. Huang and S. Wang**, “Simulation study of the magnetic coupling between radial magnetic gears,” IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 33, no. 2, MARCH 1997.

**[ZHU00] Z. Q. Zhu, and D.Howe**, “Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines”, IEEE Transaction on Energy conversion, Vol. 15, No. 4, pp. 407–412, December 2000.

**[ZHA14] X.Zhang,X.L,C.W,Z.C**; Analysis and Design Optimization of a Coaxial Surface-Mounted Permanent-Magnet Magnetic Gear, Aalborg University,Denmark,December 2014