



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique



N° d'ordre: M...../GE/2026

MEMOIRE

Pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

AMRAOUI CHIMAA

BELKHEIR ASMA

Intitulé du sujet

**Etude comparative sur la conception par FEM des machines MRV 12/8
et 6/4 avec une application industrielle de MRV 12/8**

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

Président :	Mme Neddar Houaria	MCA	Université de MOSTAGANEM
Examineur :	Omari Hamza	MAA	Université de MOSTAGANEM
Encadrant :	Chaouch Abdallah	Pr	Université de MOSTAGANEM

Année Universitaire : 2025/2026



REMERCIEMENTS

Louange à **Allah**, Seigneur des mondes, et que la paix et les bénédictions soient sur notre maître **Mohammed**, sa famille pure et ses nobles compagnons.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de master. En premier lieu, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles pour leur soutien constant et leur patience, tant dans les moments heureux que dans les périodes difficiles ; leur encouragement et leur appui ont joué un rôle déterminant dans l'achèvement de ce travail.

Nous remercions tout particulièrement notre directeur de mémoire, **M. Chaouch Abdallah**, pour ses orientations précieuses, son expertise scientifique et sa disponibilité tout au long de la réalisation du projet.

Nous exprimons également notre gratitude à **Mme. Neddar Houaria** pour son soutien continu, ses encouragements et ses remarques constructives qui ont enrichi le travail.

Nous remercions en outre le professeur **M. Omari Hamza** pour ses conseils et observations qui ont contribué à l'amélioration de l'étude.

Nous adressons enfin nos sincères remerciements à l'ensemble des membres du **Département de Génie Électrique** pour le temps et la patience dont ils ont fait preuve en lisant ce travail et en formulant des commentaires, malgré leurs engagements académiques et professionnels.

MERCI !

الاهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

قال تعالى: (قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون) ... صدق الله العظيم
إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك . ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك .. ولا تطيب الآخرة إلا
بعفوك ... ولا تطيب الجنة إلا برويتك

الله جل جلاله

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين

سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

الحمد لله حمداً وشكراً و امتناناً على البدء والختام

اهدي ثمرة جهدي الى نفسي الطموحة التي لم تخذلني

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار ... إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من أحمل أسمه بكل افتخار ..

إلى الذي لم أره يشكو يوماً وهو يحمل الدنيا على كتفيه من أجلنا إلى الذي صمت كثيراً ليتكلم تعبته عنه...

إلى الذي علمني بصمته قبل كلامه أن الرجال لا تُكسر

كل حرف في هذه المذكرة هو دين في عنقي لك..... (يا أبي)

الى من جعل الله الجنة تحت اقدامها وسهلت لي الشدائد بدعائها, الى الانسانة العظيمة التي لطالما تمننت ان تقر عينها في
يوم كهذا امي

الى ضلعي الثابت وامان ايامي الى من شددت عضدي بهم فكانوا ينابيع ارتوي منها الى خيرة ايامي وصفوتها الى قرة
عيني... إخوتي وأخواتي الغاليات.....

لكل من كان عوناً وسنداً في هذا الطريق ... للأصدقاء الأوفياء ورفقاء السنين لأصحاب الشدائد والأزمات

الى من افاضني بمشاعره ونصائحه المخلصة اليكم عائلتي .

اهديكم هذا الإنجاز وثمره نجاحي الذي لطالما تمنيت به ها انا اليوم أكملت واتممت اول ثمراته بفضلته سبحانه وتعالى

فالحمد لله على ما وهبني وان يجعلني مباركاً وان يعنني أينما كنت فمن قال انا لها نالها

وانا لها وان ابت رغماً عنها اتيت بها فالحمد لله شكراً وحبا وامتناناً على البدء والختام

واخر دعوانا ان الحمد لله رب العالمين

Belkheir Asma

الاهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

قال الله تعالى (وَأَنْ لَّيْسَ لِلْإِنْسَانِ إِلَّا مَا سَعَىٰ) وَأَنْ سَعْيُهُ سَوْفَ يُرَىٰ)

صدق الله العظيم

من قال أنا لها "نالها" وأنا لها وإن أبت رغما عنها أتيت بها.

لم يكن هذا التخرج ورقة تكتب، ولا شهادة تعلق على الجدران.....

بل كان أعواما من الصبر حين ظننت أنني لن أصل، ودموعا خبأتها خلف إبتسامة، وأحلاما كادت تتعثر لكنها أبت السقوط.

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق محفوفًا بالتسهيلات لكنني فعلتها ونلتها.

إلى الذي زين إسمي بأجمل الألقاب، من دعمني بلا حدود وأعطاني بدون مقابل....

من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحه العلم والمعرفة داعمي الأول في مسيرتي وقوتي وملأني بعد الله إلى فخري وإعتزازي أبي.....

إلى من جعل الجنة تحت أقدامها واحتضنني قلبها قبل يدها وسهلت لي الشدائد بدعائها سر قوتي ونجاحي والشمعة التي كانت لي في الليالي المضلمة إلى القلب الحنون

أمي.....

إلى من شددت عضدي بهم فكانوا لي ينابيع أرتوي منها إلى خيرة أبيامي وصوفتها إلى قرة عيني إلى ضلعي الثابت وأمان أيامي إخوتي وأخواتي.....

إلى كل من كان عونًا وسندا في هذا المشوار

إلى كل ليلة ظننت أنها النهاية، فكانت بداية جديدة، إلى خيبة صنعت مني إنسانة أقوى.

إلى كل دمعة سقطت سرا ولم يراها إلى الله، إلى النسخة القديمة مني.....

تلك الفتاة التي خافت كثيرا، وبكت كثيرا، وتعثرت كثيرا لكنها لم تستسلم.....

أهديك هذا الإلتصار.....

فهذا اليوم كتب بإسمك منذ اللحظة التي قررت فيها أن تكلمي الطريق رغم كل شي.

وإلى من سيقراً إسمي يوما على غلاف هذه المذكرة....

اعلم أن خلف هذه الإبتسامة قصة طويلة من الصبر، وأن بعض النجاحات لا تقاس بما نصل إليه، بل بما تحملناه لنصل

«وصلت..... لا لأن الطريق كان سهلاً، بل لأنني طنت في كل مرة أسقط فيها أختار الوقوف من جديد...»

Amraoui Chaïmaa

ملخص

يُعدّ محرك المقاومة المبدلة من أكثر المحركات الكهربائية شيوعاً في التطبيقات الصناعية، وذلك لبساطة بنيته ومتانته العالية. تهدف هذه الدراسة الى المقارنة بين تصميمي المحرك ذوي المعاملين 12/8 و 6/4 باستخدام برنامج lewxamI مع توحيد الابعاد والمعلومات وظروف التشغيل لكليهما. تمّ تقييم تأثير اختلاف عدد الأقطاب على أداء المحركين من حيث عزم الدوران، والسرعة، والضياعات، وكثافة التدفق المغناطيسي، والمردود. وقد كشفت النتائج عن فوارق جوهرية بين التصميمين، إذ يتفوق أحدهما في عزم الدوران عند السرعات المنخفضة، بينما يُبدي الآخر مردود أعلى عند السرعات المرتفعة. وتُقدّم هذه الدراسة إطاراً مرجعياً لاختيار التصميم الأنسب وفق متطلبات كل تطبيق.

Abstract:

The switched reluctance motor (SRM) is one of the most widely used electric motors in industrial applications, owing to its simple structure and high robustness. This study compares two motor configurations 12/8 and 6/4 using **ANSYS Maxwell** software, while maintaining the same dimensions, parameters, and operating conditions for both designs.

The performance of both motors was evaluated in terms of torque, speed, losses, magnetic flux density, and efficiency. The results reveal significant differences between the two configurations; one demonstrates superior torque at low speeds, while the other exhibits higher efficiency at elevated speeds. This study provides a reference framework for selecting the most suitable design according to the requirements of each application.

Résumé :

Le moteur à réluctance variable est l'un des moteurs électriques les plus répandus dans les applications industrielles, grâce à sa simplicité structurelle et sa robustesse. Cette étude compare deux configurations 12/8 et 6/4 à l'aide du logiciel **ANSYS Maxwell**, en conservant les mêmes dimensions et conditions de fonctionnement pour les deux.

Les performances des deux moteurs ont été évaluées en termes de couple, vitesse, pertes, densité de flux et rendement. Les résultats montrent des différences notables : l'une des configurations offre un couple supérieur à basse vitesse, tandis que l'autre présente un meilleur rendement à haute vitesse. Cette étude constitue une référence pour le choix de la configuration optimale selon les exigences de l'application.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	11
Chapitre 01 : GÉNÉRALITÉS SUR LA MRV	13
I.1 Introduction.....	14
I.2 Constitution de la MRV	14
I.3 Principe de fonctionnement des machines à réluctance variable	16
I.4 Différents types des MRV.....	19
I.4.1 MRV pure	19
I.4.2. MRV vernier	21
I.4.3. MRV hybrides.....	21
I.5 Les applications des MRV	22
I.5.1-Les applications spécifiques	22
I.5.2-Les applications ménagères	23
I.5.3-Les applications pour véhicules électriques et hybrides	23
I.5.4-Les automatismes industriels	24
I.6 Les avantages et inconvénients de la MRV	25
I.7 Conclusion	25
Chapitre 02 : Equations électromagnétiques et analyse par éléments finis	26
II.1 Introduction.....	27
II.2 Equations générales de Maxwell	27
II.2.1 Equations de Maxwell-Gauss	28
II.2.2 Equations de Maxwell-Faraday	28
II.2.3 Equations de conservation du flux magnétique	28
II.2.4 Equations de Maxwell-Ampère	28
II.3. Relation du milieu (constitutive)	28
II.3.1 Loi d'ohm	30
II.4 Modèle magnétodynamique.....	30
II.5 Définition de La Méthode des Éléments Finis.....	32
Les Avantages	33
Inconvénients.....	33
II.6 Définition du logiciel ANSYS Maxwell.....	33
II.7 Conclusion	34

Chapitre 03 : Etude et Simulation des MRV 6/4 et 12/8	35
III.1 Introduction	36
III.2 La géométrie de la MRV	36
III.3 Etude et la simulation de la machine à reluctance variable 6/4.....	36
III.3.1 Les paramètres de la machine MRV 6/4	37
III.3.2 Les Courbes caractéristiques	37
III.4 Etude et la simulation de la machine à reluctance variable 12/8.....	40
III.4.1 Les paramètres de la machine 12/8.....	40
III.4.2 Analyse par les éléments finis des modèles MRV	41
III.4.3 Les Courbes caractéristiques	43
III.5 Comparaison entre les deux moteurs à reluctance variable.....	48
III.6 Application industrielles de ce type moteur 12/8	49
III.7 Exemple d'application d'un moteur MRV 12/8 pour le pompage de liquide de refroidissement (dans Véhicules Électriques)	50
1. Calcul de la puissance hydraulique disponible.....	50
2. Détermination du débit et de la hauteur de refoulement	51
3. Conclusion.....	51
III.8 Conclusion.....	53
CONCLUSION GENERALE.....	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	55

Table DES FIGURES

Figure N°	Titre de Figure	page
Figure I-1	Constitution d'une MRV	14
Figure I-2	Structure d'une MRV 6/4	15
Figure I-3	MRV 12/8 typique avec 12 pôles au stator et 8 pôles au rotor	15
Figure I-4	Machine à réluctance variable structure élémentaire	16
Figure I-5	Structure de la MRV de base et positions extrêmes du rotor	17
Figure I-6	Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor	18
Figure I-7	Structure électromagnétique d'une MRV 8/6	18
Figure I-8	Positions d'opposition et de conjonction d'une MRV 8/6	19
Figure I-9	MRV à deux dents par phase	20
Figure I-10	MRV à plus de deux dents par phase	20
Figure I-11	pole statorique dentés	20
Figure I-12	MRV à effet vernier à stator externe et interne	21
Figure I-13	MRV hybride	21
Figure I-14	Les applications spécifiques	22
Figure I-15	Les appareils ménagers	23
Figure I-16	Moteur hybride destiné à la traction	23
Figure I-17	Système d'aération dans les transports en commun	24
Figure I-18	Moteur « in Wheel » pour véhicules	24
Figure I-19	Portes automatiques	24
Figure III-1	Géométrie du MRV (6/4) et 12/8 pour (ANSYS Inc., 2018).	36
Figure III-2	Les courants en fonction de temps (MRV 6/4).	37
Figure III-3	Flux en fonction de courant.	38
Figure III-4	Le rendement en fonction de la vitesse.	38
Figure III-5	La puissance de sortie en fonction de la vitesse.	39
Figure III-6	Le couple de sortie en fonction de la vitesse.	39
Figure III-7	Le couple en fonction du temps	40
Figure III-8	Modèle MRV 12/8 3D	41
Figure III-9	Discretisation des éléments de maillage 2D et 3D	41
Figure III-10	Le flux magnétique 2D et 3D	42
Figure III-11	les linges de flux 2D	43
Figure III-12	Inductance en fonction de degré électrique	44
Figure III-13	Inductance en fonction de temps	44

Figure N°	Titre de Figure	Page
Figure III-14	Les courants en fonction du temps	45
Figure III-15	Le flux en fonction du courant	45
Figure III-16	Le flux en fonction de temps	46
Figure III-17	Le couple en fonction de temps	46
Figure III-18	Le couple de sortie en fonction de la vitesse	47
Figure III-19	La puissance en fonction de la vitesse.	47
Figure III-20	Le rendement en fonction de la vitesse	48
Figure III-21	La structure fonctionnelle du système de climatisation et de réfrigération dans une voiture électrique.	52

LISTE DES NOTATIONS

MRV : Machines à réluctance variable.

MRVDS : Machine à Réluctance Variable à Double Saillance.

MEF : Méthode des éléments finis.

SRM: Switched Reluctance motor.

F.M.M : La Force Magnétomotrice.

LISTE DES SYMBOLES

N_s : Nombre de dents stator.

N_r : Nombre de dents rotor.

m: Le nombre de phases.

θ_m: Angle mécanique.

θ_e: Angle électrique.

C_{em} : Couple électromagnétique.

L : L'inductance.

$\vec{D}$: Vecteur de déplacement ou excitation électrique.

ρ : Densité volumique de charge électrique.

$\vec{B}$: Vecteur induction magnétique.

$\vec{E}$: Vecteur champ électrique.

$\vec{H}$: Vecteur champ magnétique.

$\vec{J}_c$: Vecteur densité du courant électrique de conduction.

$\vec{J}_D$: Vecteur densité du courant électrique de déplacement.

ε : Permittivité électrique.

ε₀: Permittivité diélectrique absolue.

ε_r: Permittivité diélectrique du milieu.

μ : Perméabilité magnétique.

μ₀: Perméabilité magnétique absolue.

$\vec{B}_r$: Induction rémanente.

$\vec{J}_{ind}(\sigma \vec{E})$: Densité du courant induit.

$\vec{J}_{ex}$: Densité du courant d'excitation.

$\vec{v}$: Vecteur vitesse de déplacement des pièces conductrices mobiles.

σ : Conductivité électrique.

$\vec{J}_s$: Le terme courant de source.

$\vec{A}$: Le potentiel vecteur.

β_r: Facteur d'enlacement de rotor.

β_s: Facteur d'enlacement de stator.

P(h) : Puissance hydraulique.

P(m) : Puissance du moteur.

Q : Débit.

H : Hauteur de refoulement.

φ : Masse volumique du fluide.

g : Accélération due à la gravité.

η_p : Rendement de la pompe (%).

INTRODUCTION GENERALE

L'être humain a constamment cherché, à travers les différentes époques historiques, à innover et à développer continuellement les outils et les moyens techniques, dans le but de faire face aux exigences de la vie quotidienne et de s'adapter à ses défis en perpétuelle évolution. La révolution industrielle a contribué de manière remarquable au renforcement de cette orientation, les machines étant devenues un pilier fondamental dans la marche du progrès technique et économique.

À la lumière de cela, il est devenu impossible de concevoir une économie développée en dehors d'un système industriel reposant sur des machines robustes et hautement fiables. Les machines électriques classiques telles que les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif ont prouvé leur valeur et leur efficacité dans diverses applications, grâce à leur flexibilité d'adaptation aux différents secteurs, ainsi qu'à leurs performances remarquables en termes de puissance et de vitesse.

Cependant, vers la fin des années soixante, la scène technique a connu l'émergence d'une nouvelle génération de machines tournantes, accompagnant un essor notable dans le domaine de l'électronique de puissance. Parmi les plus importantes de ces machines figurent les moteurs à réluctance variable (MRV) [20].

Les machines à réluctance variable représentent une classe particulière de machines électromagnétiques dans lesquelles les forces sont obtenues grâce à la variation de la perméance d'un circuit magnétique entouré par des bobinages. Cette variation est obtenue lors du déplacement relatif des deux parties constitutives : le stator et le rotor dans les machines électriques tournantes. Ces variations de perméance sont sources de variations d'énergie électromagnétique ou encore de variations de réluctance, de perméance ou d'inductance (vues du bobinage), d'où le nom de "machines à réluctance variable". Ainsi, le stator ferromagnétique supporte les bobinages, quant au rotor, qui ne possède aucun conducteur ni aimant, il a une denture destinée à faire varier l'inductance du circuit électromagnétique [10].

Grâce à l'évolution technologique récente de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, le domaine d'entraînement à vitesse variable, a connu ces dernières années un essor considérable.

Les moteurs à reluctance variable (MRV) sont le centre de beaucoup de recherche pendant les dernières trois décennies. Une étude comparative entre les différentes machines alternatives de faible puissance montre que cette machine présente un couple massique compris entre celui d'une machine asynchrone et celui d'une machine à aimants [18]. L'avantage principal qu'offre cette machine porte sur sa puissance volumique, relativement importante, ce qui la rend adaptée aux applications embarquées. Le domaine d'utilisation englobe l'usinage à grande vitesse, les compresseurs, la propulsion navale, les centrifugeuses, le stockage inertiel, etc.

L'absence des pertes rotoriques par effet Joule, sa construction et la relative simplicité de sa commande font que la MRV se présente comme une véritable concurrente de la machine asynchrone avec laquelle elle partage la robustesse [19].

Notre travail consiste à une étude comparative entre les deux machines MRV 6/4 et 12/8 par la simulation sous logiciel ANSYS et nous proposerons des applications avec un calcul de dimensionnement pour le moteur MRV 12/8.

Dans cet ordre d'idées nous subdivisons notre mémoire en trois chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, nous présenterons, de manière succincte une recherche bibliographique sur les différents types de machines à réluctance variable et le principe de fonctionnement pour une structure de MRV élémentaire puis nous citerons les applications industrielles ainsi que les avantages et les inconvénients des MRV.

Dans le deuxième chapitre sera à la modélisation de la machine en basant sur les équations électromagnétiques du Maxwell. Ensuite nous donnerons un aperçu sur la méthode des éléments finies et l'utilisation du logiciel ANSYS Maxwell.

Dans le troisième chapitre est l'objectif principal de notre travail, le chapitre présentera notre simulation numérique sous logiciel ANSYS Maxwell des deux machines MRV 6/4 et 12/8 par la suite nous faisons une étude comparative en se basant sur leurs performances et nous terminerons ce chapitre par le calcul de dimensionnement d'une application industrielle.

Enfin notre conclusion générale et nos perspectives.

Chapitre 01 :
GÉNÉRALITÉS
SUR LA MRV

I.1 Introduction

Le terme machines à réluctance variable (MRV) couvre différents types de machines, qui partagent toutes une caractéristique fondamentale : un changement notable dans la forme de l'entrefer pendant la rotation. Ces machines furent longtemps oubliées, jusqu'à leur réapparition en 1969 sous forme de moteurs, ce qui donna lieu à de nouvelles explications théoriques. Actuellement, grâce au développement rapide dans le domaine de la robotique et aux grands progrès de l'électronique de puissance, ces machines sont dans une phase de développement continu [1].

Le moteur à réluctance variable est un type de moteur que génère un couple en utilisant l'effet physique des lignes de force magnétique se déplaçant vers le chemin de réluctance minimale. Il ne nécessite pas d'aimants permanents ni de bobines de rotor, il n'y a donc pas de problème de pertes par effet Joule dans le rotor et il est très adapté à une utilisation dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable.

I.2 Constitution de la MRV

Le circuit magnétique d'un moteur à réluctance variable (MRV) se compose de deux composants principaux :

Stator : Il est formé par l'accumulation de tôles perforées et formées avec précision qui portent les bobines électriques qui représentent les différents aspects du moteur.

La partie mobile (rotor) : C'est l'élément passif du système, car il est totalement dépourvu de conducteurs électriques et d'aimants permanents. Il est constitué d'un faisceau de tôles d'acier laminées empilées les unes sur les autres, formant un certain nombre d'électrodes symbolisées par N_r (figure I.1) [2].

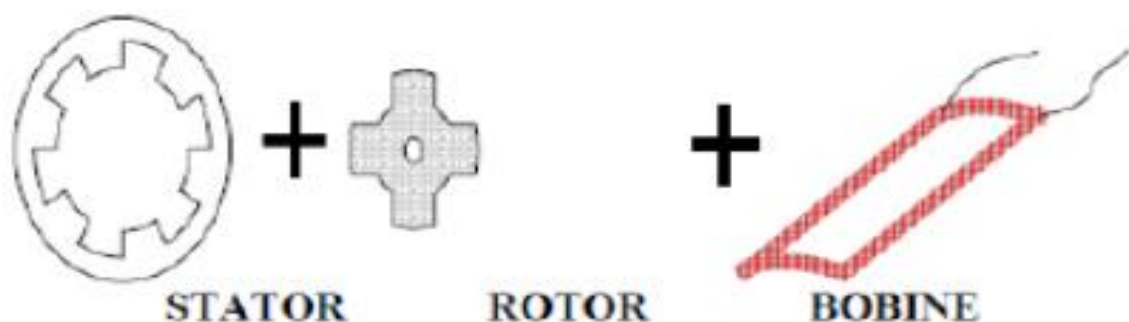


Figure I.1 : Constitution d'une MRV.

Les machines MRV ont une construction simple à double denture, car elles n'ont pas de bobines ni d'aimants permanents dans le rotor. Chaque type est défini par une désignation reflétant le nombre de ses dents ; par exemple "6/4" signifie : 6 dents au stator (N_s) et 4 dents au rotor (N_r), uniquement le stator contient un enroulement composé de bobines disposées sur deux dents statoriques opposées sont reliées en série, constituant ainsi une phase de l'enroulement. Quant aux circuits magnétiques des deux parties, ils sont fabriqués à partir d'un empilage de tôles magnétiques afin de minimiser au maximum les pertes par courant de

Foucault (figure I.2). Le nombre de phases (m) du moteur est donc égal à la moitié du nombre de dents N_s présent sur le stator [3] :

$$m = \frac{N_s}{2} \quad (\text{I.1})$$

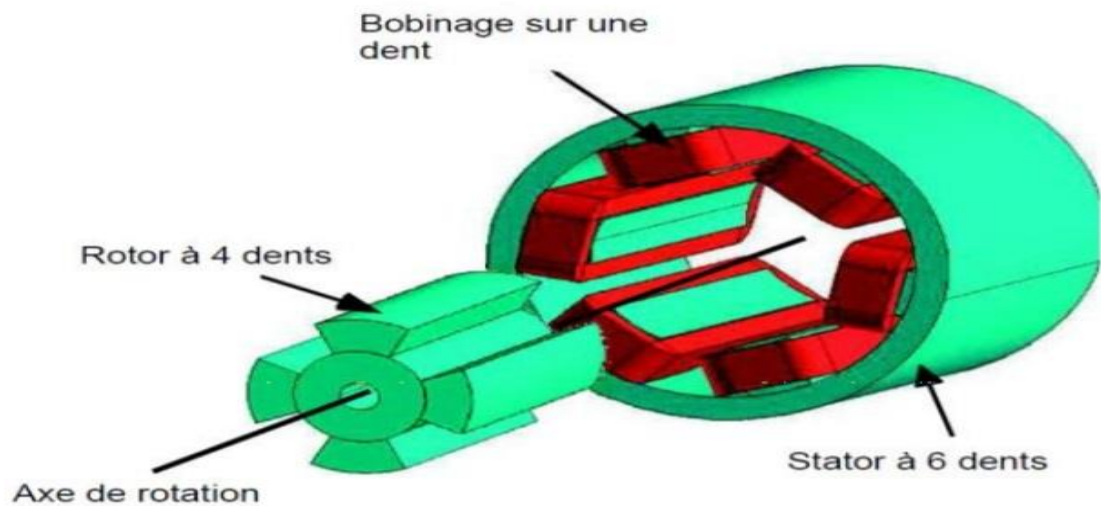


Figure I.2 : Structure d'une MRV 6/4.

Le nombre de pôles du stator est volontairement différent du nombre de pôles du rotor, afin d'éviter un état de déséquilibre qui pourrait restreindre la rotation du rotor et annuler le couple de démarrage lorsque les pôles correspondent. Les bobines du stator sont enroulées sur des pôles opposés et connectées les unes aux autres en série ou en parallèle pour former des circuits électriques indépendants appelés phases. Ces aspects peuvent être excités individuellement ou conjointement selon le schéma de contrôle approuvé. La figure (I.3) représente une coupe transversale d'un moteur MRV de type 12/8, qui comprend 12 pôles dans le stator et 8 pôles dans le rotor. Il s'agit d'un moteur triphasé dont chaque face est constituée de trois bobines enroulées autour de pôles opposés [2].



Figure I.3 : MRV 12/8 avec 12 pôles au stator et 8 pôles au rotor.

I.3 Principe de fonctionnement des machines à réluctance variable

Indépendamment du type de machine à réluctance variable considéré (cylindrique, linéaire, Vernier à grandes dents...), le principe de fonctionnement demeure identique lorsque les couplages magnétiques entre les phases sont négligeables. Ce principe peut être expliqué en se basant sur l'analyse d'une structure monophasée élémentaire, identique à celle représentée (Figure I.4).

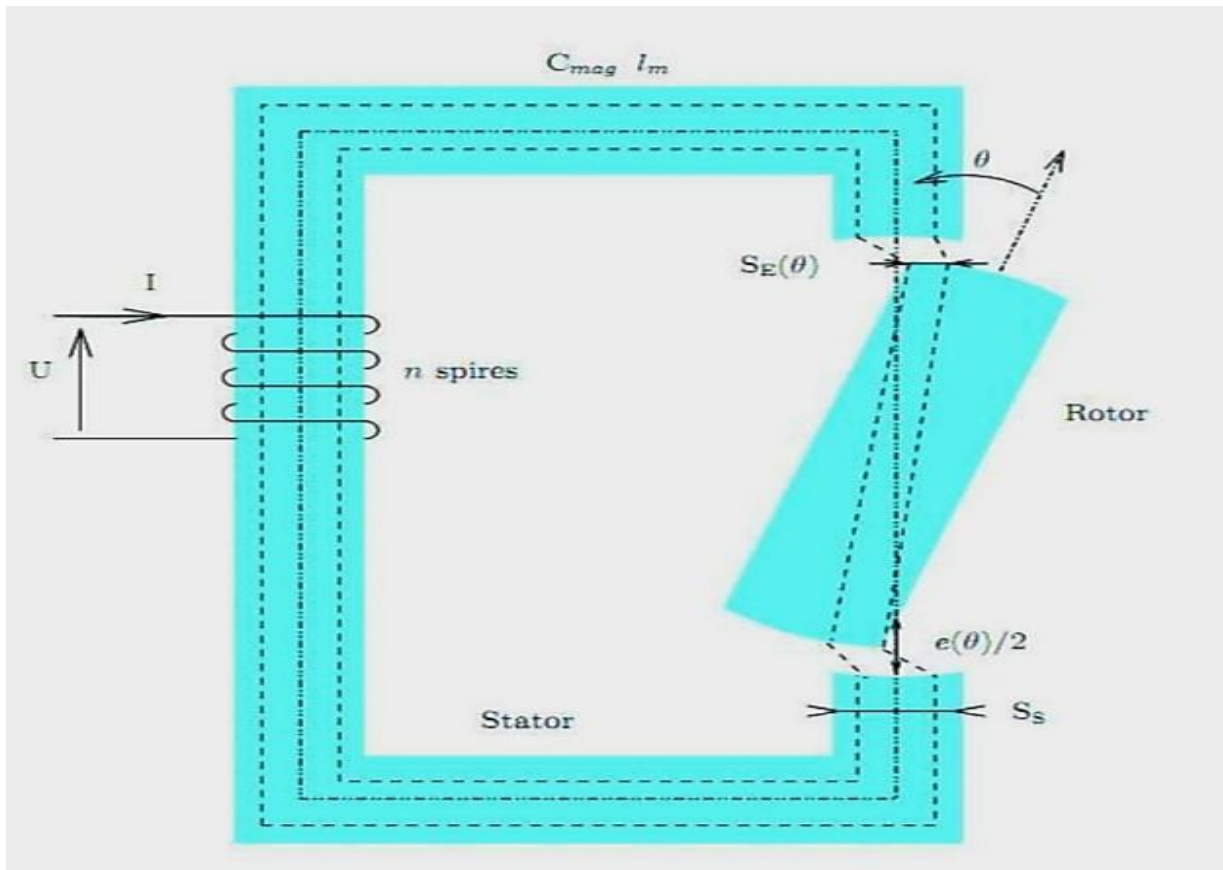
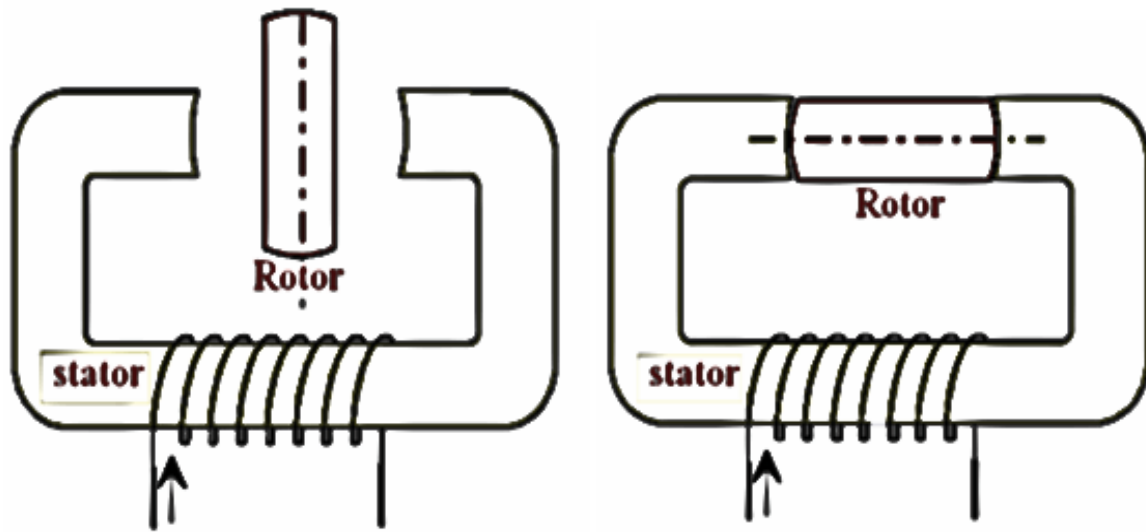


Figure I.4 : Machine à réluctance variable structure élémentaire.

Ce circuit magnétique simple est constitué de deux pièces ferromagnétiques, l'une fixe (le stator) portant une bobine à N spires qui transporte un courant électrique (I), et l'autre mobile (le rotor) autour d'un axe fixe. Le symbole θ_m représente l'angle entre l'axe longitudinal du segment mobile et l'axe inter polaire du segment fixe. Cette structure se caractérise par deux positions rotatives prééminentes :

- Une position montrée dans la figure (I.5) –(a), qui est la situation dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale appelée position d'opposition.
- Une position illustrée par la figure (I.5) –(b), qui est la situation dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale appelée position de conjonction.

(a) : position d'opposition : $\theta = 0^\circ$ (b) : position de conjonction : $\theta = 90^\circ$ **Figure (I.5) :** Structure de la MRV de base et positions extrêmes du rotor.

Si le système est placé dans une position entre l'opposition et la conjonction, et qu'un courant est injecté dans l'enroulement d'excitation, il se déplace de manière à atteindre une réluctance minimale (un flux maximal), poussant le rotor vers une position stable de conjonction. Si l'énergie cinétique accumulée pendant cette étape est suffisante, une fois le courant interrompu, pour garantir la rotation du rotor jusqu'à une position opposée, il devient possible de réitérer le processus pour obtenir un mouvement de rotation ininterrompu. En fournissant des informations sur la position au bobinage, on parvient alors à une opération de type autopilote synchrone [1]. Dans l'exemple utilisé pour la description du principe, il apparaît que le système présent, pour un tour mécanique deux fois la même géométrie, on peut donc définir, pour une machine possédant deux dents rotoriques, l'angle électrique :

$$\theta_e = 2 \times \theta_m \quad (\text{I.2})$$

sachant que l'expression du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} i^2 \quad (\text{I.3})$$

L'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance donnera le régime de fonctionnement souhaité tel que ;

- ♦ Moteur ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance $\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial (\theta_m)} > 0$
- ♦ Générateur ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance $\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial (\theta_m)} < 0$

Le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction et si on injecte un courant dans l'armature fixe, ce dernier modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale, c'est-à-dire le passage du flux maximal entre les armatures. Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la

rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors on pourra répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation.

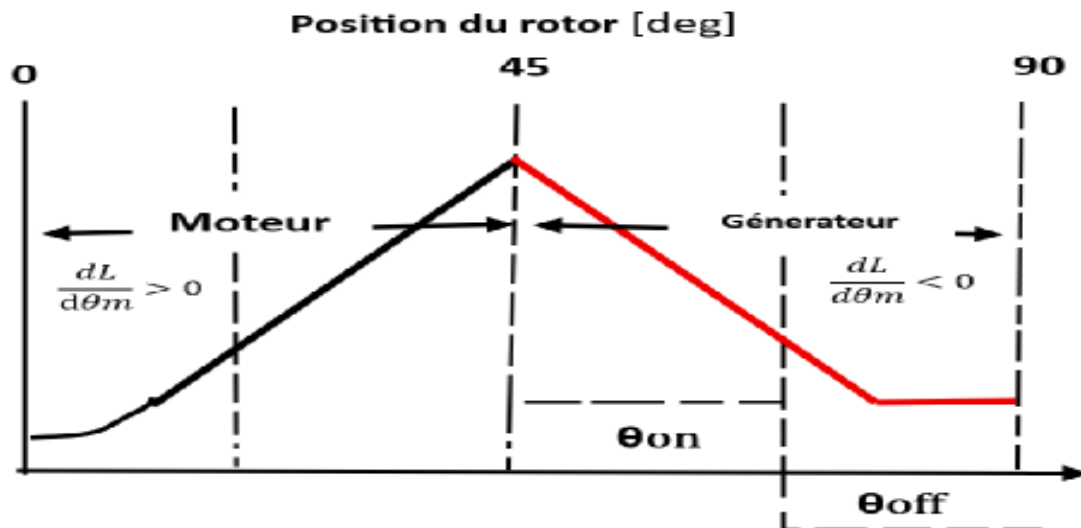


Figure (I.6): Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor.

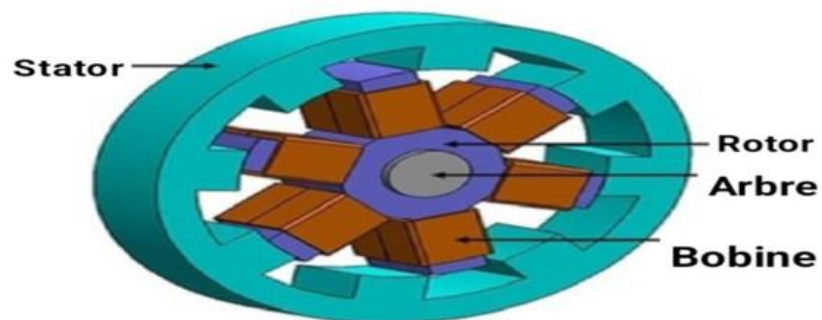


Figure (I.7): Structure électromagnétique d'une MRV 8/6.

Quand le rotor se trouve entre les positions d'opposition et de conjonction, l'introduction d'un courant dans l'enroulement d'excitation perturbe l'équilibre du système, qui s'efforce ensuite de réduire sa réluctance (pour augmenter le flux magnétique).

Cela entraîne une rotation du rotor vers la position de conjonction. Si, suite à une interruption d'alimentation, l'énergie cinétique stockée parvient à faire tourner le rotor jusqu'à la prochaine position d'opposition, le cycle peut être réitéré, garantissant de ce fait une rotation continue [4]

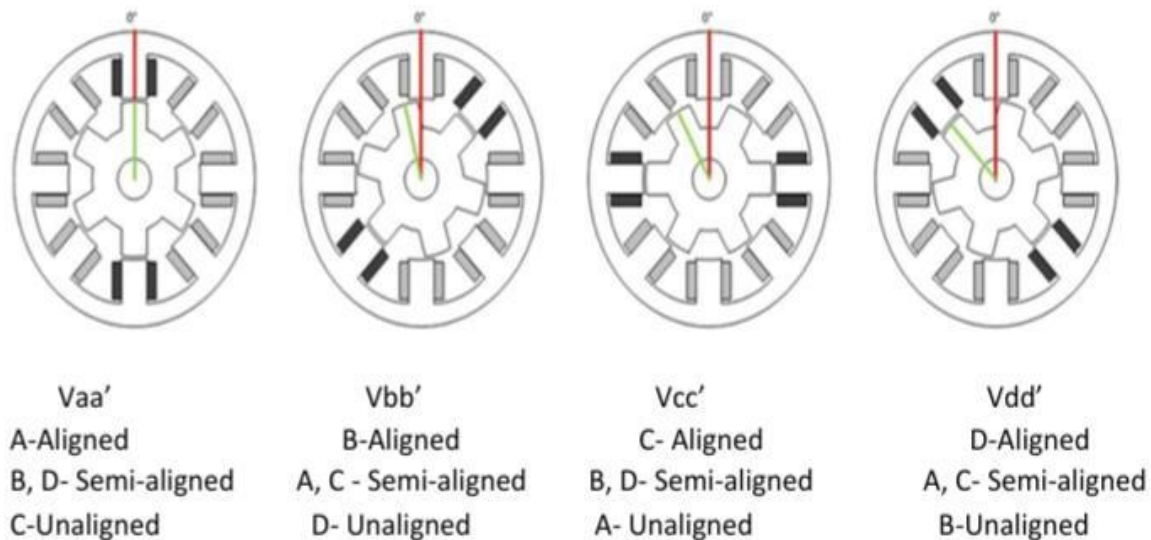


Figure (I.8): Positions d'opposition et de conjonction d'une MRV 8/6.

L'intervalle de changement de la reluctance d'une phase est défini comme étant le passage du moment où une dent est en conjonction avec une autre dent, jusqu'à ce que la suivante soit atteinte.

L'expression pour le lien entre les angles électriques (θ_e) et mécaniques (θ_m) est la suivante:

$$\theta_e = N_r \times \theta_m \quad (\text{I.4})$$

I.4 Différents types des MRV

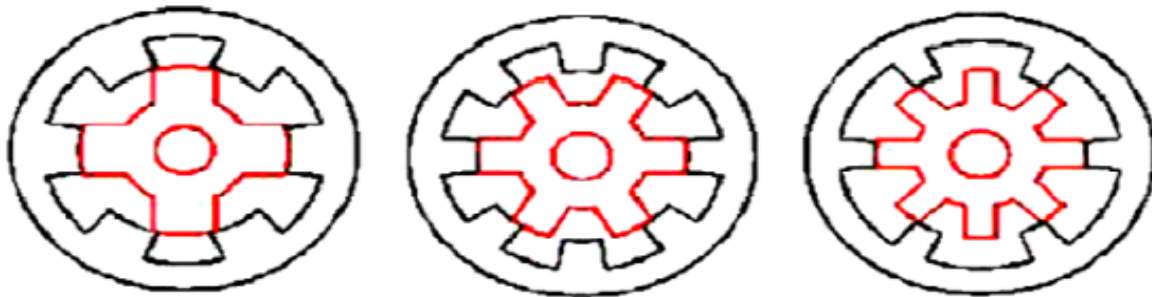
Les machines à résistance variable sont divisées en trois types principaux Il existe 3 types des machines à réluctance variable [5] :

- ❖ MRV pure.
- ❖ MRV vernier.
- ❖ MRV hybride.

I.4.1 MRV pure

La machine à reluctance variable, également appelée «pure », se caractérise par un stator et un rotor proéminents, avec un stator « actif » contenant les enroulements et un rotor passif (sans bobinage ni aimants), ce qui la différencie des machines synchrones et asynchrones. Une autre caractéristique est qu'elle ne fonctionne pas sur la base d'un champ tournant, mais plutôt sur un champ « pulsé ». Ce type de moteur à réluctance fonctionne avec des courants unidirectionnels de forme rectangulaire, ce qui caractérise ses alimentations. Les types de structures à réluctance pure :

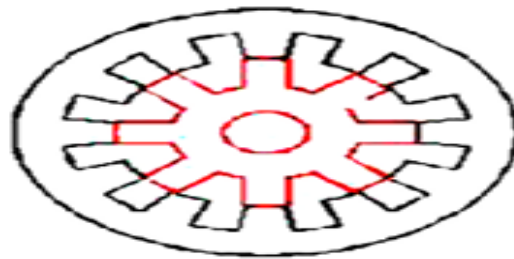
- Structures à double denture «simple» («gosses dents») et à 2 dents par phase (figure I.9).
- Structures à double denture «simple» («gosses dents») et à plus de 2 dents par phase (figure I.10).
- Structures à pôles statoriques dents (« petites dents ») où un bobinage excite plusieurs dents à la fois : on parle de « bobinage global » (figure I.11).



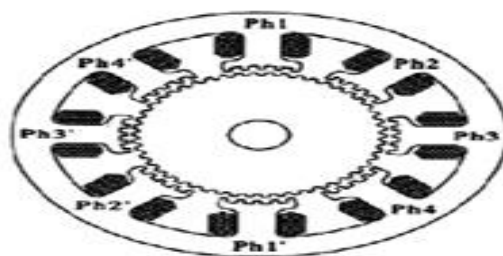
6/4-12 pas par tour

8/6-24 pas par tour

6/8- 24 pas par tour

Figure(I.9) : MRV à deux dents par phase.

12/8- 4 dents par phase et 24 pas par tour

Figure(I.10) : MRV à plus de deux dents par phase.**Figure(I.11) :** pôle statorique dentés.

I.4.2. MRV vernier

Les MRV à effet vernier partagent les mêmes structures que les MRV pure, à l'exception qu'ils bénéficient d'enroulements dispersés et sont alimentés en courant alternatif sinusoïdale plutôt qu'en créneaux.

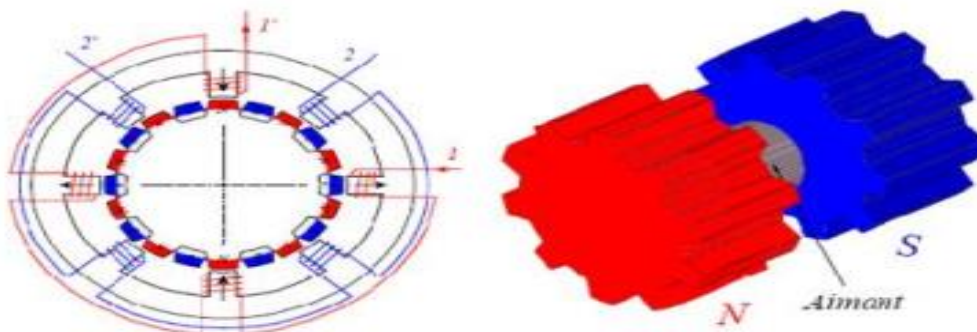
On utilise des dispositifs appelés « vernier à grand nombre de dents », dotés de deux structures proéminentes; chaque structure présente les mêmes dents, mais le nombre de dents statoriques et rotoriques varie légèrement (analogique à une machine synchrone avec rotor lisse), ce qui permet d'atteindre une perméance sinusoïdale. On rencontre également des machines dites « vernier à grosses dents », dans lesquelles chaque dent du stator constitue un pôle en elle-même. Dans ce contexte, les quantités de pôles sont plutôt basses et les performances en termes de couple et de vitesse sont comparables à celles des machines synchrones et asynchrones à aimants avec des fréquences d'alimentation similaires [6].



Figure(I.12) : MRV à effet vernier à stator externe et interne [4].

I.4.3. MRV hybrides

Contrairement aux structures précédentes, les MRV hybrides se distinguent par l'incorporation d'aimants permanents pour optimiser leurs performances.



Figure(I.13) : MRV hybride.

L'intégration d'aimants dans les structures à double saillance permet de pallier un entrefer excessif, cependant on s'écarte des structures à réluctance pure. Il convient toutefois de noter deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRVDS: l'une utilise des aimants installés sur le rotor, ce qui la rapproche des machines synchrones à aimants enfouis (Magnet Permanent Interior): la seconde garde le rotor passif de la MRV pure en employant des aimants positionnés sur le stator: on parle alors d'une machine à double saillance et aimants permanents statoriques (DSPMM), également appelée «MRV polarisée».

I.5 Les applications des MRV

Globalement, le MRV présente de multiples atouts et peut être déployé efficacement en tant que moteur à vitesse variable. Il fournit des solutions pour une variété d'applications, y compris celles de petite envergure qui requièrent un tirage, offrant des performances adéquates et des puissances pouvant s'élever à plusieurs dizaines de kilowatts. Le MRV représente une option attrayante dans de nombreux contextes. Nous pouvons mentionner parmi ces applications [7] :

I.5.1-Les applications spécifiques : Compresseurs, ventilateurs, pompes, les équipements médicaux et de laboratoire comme les pousse-seringues (figure I.14.a), les centrifugeuses (figure I.14.b), ainsi que les roulants électriques (figure I.14.c).



(a) : Pousse-seringue.



(b) : Centrifugeuse.



(c) : Fauteuil roulant électrique.

Figure I.14 : Les applications spécifiques.

I.5.2-Les applications ménagères : Robot ménager (figure I.15.a), lave-linge (figure I.15.b), lave-vaisselle...horlogerie, jouets.



(a) : Robot ménager.

(b) : Lave-linge.

Figure I.15 : Les appareils ménagers.

I.5.3-Les applications pour véhicules électriques et hybrides : Figure I.16, le domaine de traction électrique sur rails comme les MRV linéaires ainsi que les rotors « in Wheel » directement associés aux roues (figure I.18) et les équipements de bord (figure I.17).



Figure I.16 : Moteur hybride destiné à la traction.

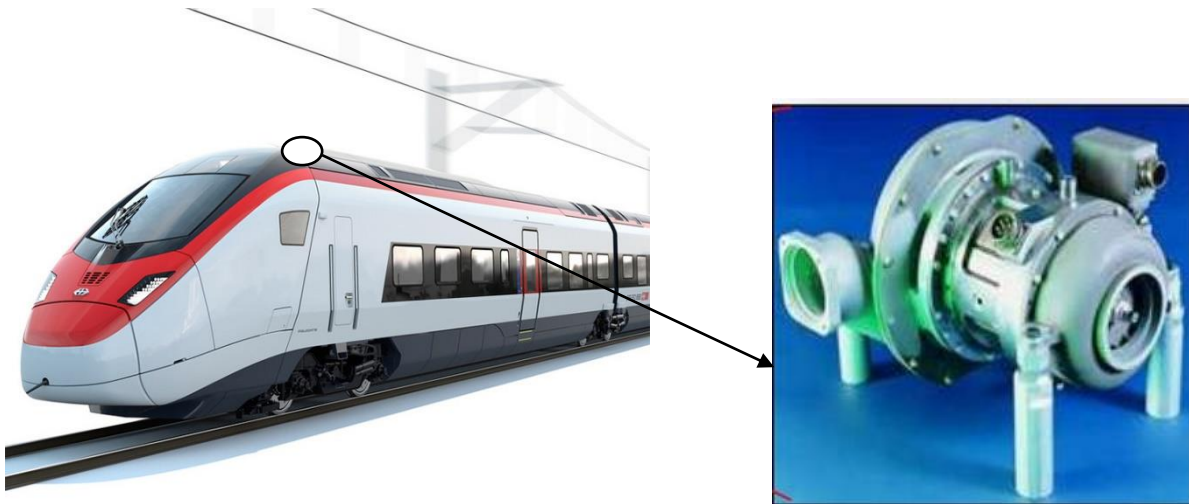


Figure I.17 : Système d'aération dans les transports en commun.

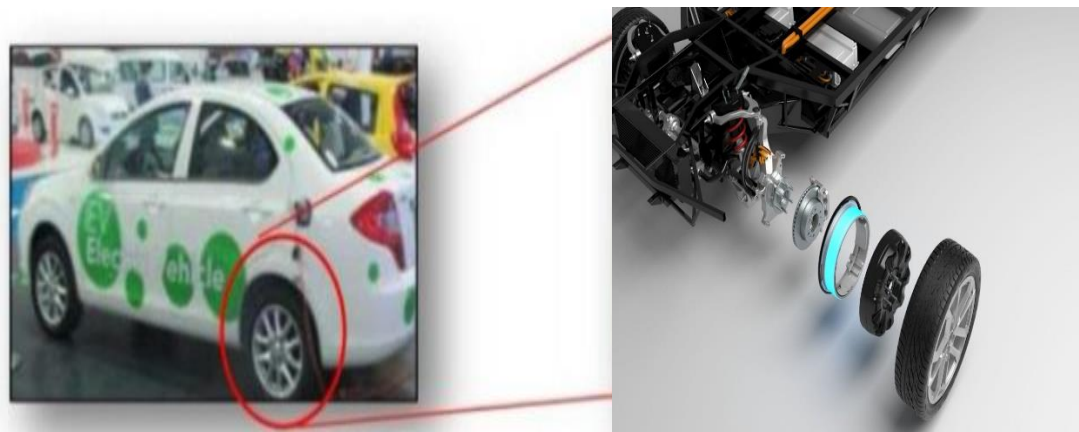


Figure I.18 : Moteur « in Wheel » pour véhicules.

I.5.4-Les automatismes industriels : Ascenseurs, servomécanismes, portes automatiques (figure I.19), actionneurs, positionnement...

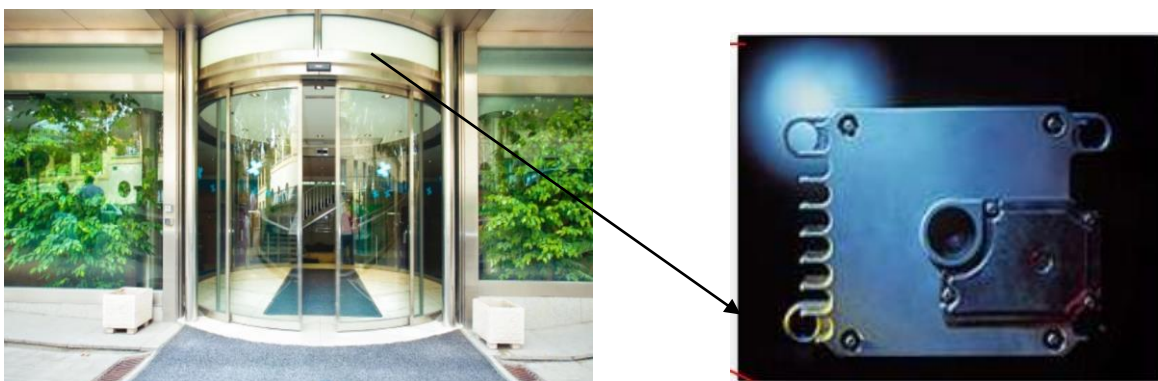


Figure I.19 : Portes automatiques.

- Les équipements informatiques et bureautiques : impression, ventilateur, têtes de lecture...
- Les pompes à fuel et appareillages embarqués à bord des avions, navettes spatiales, fusées et différents équipements aéronautiques et aérospatiaux ; Le manque d'une atmosphère dans l'espace fait que le moteur électronique est le seul choix viable pour les systèmes de propulsion des robots d'exploration spatiale. L'agence NASA pour son programme d'exploration de mars a conçu un MRV pouvant supporter une température de 540° pendant 27 heures.

I.6 Les avantages et inconvénients de la MRV

Par apport aux machines classiques « machine à courant alternatif » et dite « machine à courant continu » les MRV les avantages suivants [8] :

- Possibilité de fonctionnement à puissance quasi constant sur une large de vitesse.
- Pertes essentiellement concentrées au stator donc refroidissement aisé.
- Fonctionnement dégradé possible grâce à l'indépendance de chaque phase.
- Structure simple et robuste pour un faible cout de fabrication.
- Excellent dans des environnements extrêmes. Ils sont souhaitables pour des applications à haute température et haute vitesse.
- Couple massique relativement élevé...

➤ Inconvénients :

La MRV à ce pondant quelques limites :

- Elle doit être commutée électroniquement et ne peut donc être alimentée directement par une source alternative ou continue.
- L'ondulation du couple provoque des vibrations de la machine.
- Ses caractéristiques magnétiques non linéaires compliquent son analyse et son contrôle.
- Sa structure dentée, cause d'oscillations de couple et de bruits, surtout à vitesse élevée.

I.7 Conclusion

Le moteur à reluctance variable, qui est en réalité un type de moteur dont la résistance magnétique varie selon la circonférence de l'entrefer et qui ne nécessite pas d'excitation du rotor. Le champ magnétique n'est généré que par l'effet de la Force Magnétomotrice (F.M.M) du stator, et le couple électromagnétique se manifeste suite à la fluctuation de l'énergie dissipée par le champ magnétique dans l'entrefer lors d'un désalignement des axes du champ statorique. L'adaptation de la géométrie et du matériau du rotor permet une variation de la réluctance magnétique du circuit. Ce chapitre a permis d'exposer les diverses structures des moteurs à reluctance variable, leurs composants et conditions d'opération, ainsi que certaines applications industrielles basées sur une recherche bibliographique approfondie.

Chapitre 02 :
Equations
électromagnétiques
et analyse par
éléments finis

II.1 Introduction

L'électromagnétisme constitue le cadre théorique unifiant les phénomènes électriques et magnétiques. C'est en 1831 que Faraday mit en évidence les phénomènes **d'induction électromagnétique**, établissant ainsi le lien fondamental entre les domaines de l'électricité et du magnétisme. Il fut démontré qu'un champ magnétique variant temporellement est susceptible d'engendrer un champ électrique variable.

Quelques années plus tard, en 1864, Maxwell proposa une description rigoureuse et cohérente de l'ensemble des phénomènes électromagnétiques. Il postula le principe de **la réciprocité de l'induction**, selon lequel un champ électrique variable dans le temps constitue à son tour une source de champ magnétique. L'ensemble de ces travaux fut synthétisé sous la forme de quatre équations locales, communément désignées sous le nom **d'équations de Maxwell**. Ces équations traduisent l'unité profonde des phénomènes électriques et magnétiques et permettent, en outre, d'identifier la lumière comme une onde électromagnétique se propageant dans le vide à la vitesse [9].

Dans le cadre de l'étude du champ électromagnétique au sein de la Machine à Réductance Variable (MRV), la résolution des équations de Maxwell s'avère indispensable. Cette résolution est généralement effectuée par le recours à des méthodes d'analyse numérique. Parmi celles-ci, **la méthode des éléments finis (MEF)** se distingue comme l'approche la plus répandue et la mieux adaptée aux problématiques d'électromagnétisme rencontrées en génie électrique [10].

Nous allons essayer d'éclaircir ce choix en présentant les modèles les plus utilisés.

II.2 Equations générales de Maxwell

La première étape inhérente à toute étude rigoureuse des phénomènes physiques consiste en l'établissement des équations qui les régissent. Dans ce cadre, les équations de Maxwell constituent le fondement théorique indispensable sur lequel repose cette démarche analytique. En effet, en s'appuyant sur les relations fondatrices de l'électricité et du magnétisme, Maxwell parvint à formuler quatre équations unificatrices, regroupant ces deux domaines au sein d'un cadre théorique unifié et cohérent, donnant ainsi naissance à la théorie de l'électromagnétisme.

Ces quatre équations, couplées aux relations constitutives caractérisant les milieux qui composent le dispositif étudié, ainsi qu'à la loi d'Ohm généralisée, permettent de gouverner de manière exhaustive et rigoureuse l'ensemble des phénomènes électromagnétiques. Elles représentent, de ce fait, un outil fondamental et incontournable pour toute analyse relevant de ce domaine [11].

Ces équations se présentent comme suit :

II.2.1 Equations de Maxwell-Gauss

Cette équation exprime la conservation des charges électriques de conduction

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{II.1}$$

- $\vec{D}$: Vecteur de déplacement ou excitation électrique [C/m²].
- ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m³].

II.2.2 Equations de Maxwell-Faraday

Cette équation caractérise le couplage entre les phénomènes magnétiques et les phénomènes électriques

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{II.2}$$

- $\vec{B}$: Vecteur induction magnétique [T].
- $\vec{E}$: Vecteur champ électrique [V/m].

II.2.3 Equations de conservation du flux magnétique

Cette équation exprime le champ B qui est à flux conservatif.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{II.3}$$

II.2.4 Equations de Maxwell-Ampère

Cette équation exprime que le fait que le champ magnétique peut être créé non seulement par un courant électrique mais aussi par la variation d'un champ électrique.

$$\left. \begin{aligned} \vec{\nabla} \wedge \vec{H} &= \vec{J}_{total} \\ \vec{J}_{total} &= \vec{J}_c + \vec{J}_D \end{aligned} \right\} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{II.4}$$

- $\vec{H}$: Vecteur champ magnétique [A/m].
- $\vec{J}_c$: Vecteur densité du courant électrique de conduction [A/m²].
- $\vec{J}_D$: Vecteur densité du courant électrique de déplacement [A/m²].

II.3. Relation du milieu (constitutive)

La relation diélectrique peut s'écrire comme suit :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad \text{II.5}$$

Comme :

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

Alors :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad \text{II.6}$$

Avec

ε : Permittivité électrique [F/m].

ε_0 : Permittivité diélectrique absolue.

ε_r : Permittivité diélectrique du milieu.

ε Peut dépendre de :

- La température
- La fréquence
- Du champ $\vec{E}$ milieu non linéaire
- De l'espace anisotrope

La relation magnétique peut s'écrire comme suit :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \quad \text{II.7}$$

Et comme :

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Alors :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad \text{II.8}$$

Avec

μ : Perméabilité magnétique.

μ_0 : Perméabilité magnétique absolue $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ [H/m].

$\vec{B}_r$: Induction rémanente, $\vec{B}_r = 0$ car le phénomène de l'alimentation rémanente dans les ferromagnétiques est négligeable.

II.3.1 Loi d'ohm

Elle exprime le passage entre la densité du courant et le champ électrique dans un milieu donné.

La densité du courant $\vec{J}_{ind}$ peut s'exprimer comme suit :

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \vec{E} \quad \text{II.9}$$

Avec σ : conductivité électrique [$\Omega.m^{-1}$]

Avec le terme courant de source ($\vec{J}_s$), la loi d'Ohm s'écrit

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad \text{II.10}$$

Donc

$$\vec{J}_c = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad \text{II.11}$$

➤ $\vec{J}_{ind}(\sigma \vec{E})$: Densité du courant induit.

➤ $\vec{J}_{ex}$: Densité du courant d'excitation.

➤ $\vec{v}$: Vecteur vitesse de déplacement des pièces conductrices mobiles.

II.4 Modèle magnétodynamique

Le modèle magnétodynamique permet d'appréhender et de prédire le comportement électromagnétique de la Machine à Réductance Variable (MRV) en régime dynamique, c'est-à-dire dans des conditions où les sources de courant ou de tension présentent une variation temporelle. C'est-à-dire que le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \neq \mathbf{0}$, les champs électriques et magnétiques sont alors couplés par la présence des courants induits [12].

Ecrivons les deux équations (II.2) et (II.3) de Maxwell qui se présentent sans terme source :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{II.12}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad \text{II.13}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \mathbf{0} \quad \text{II.14}$$

Le potentiel vecteur $\vec{A}$ Joue un rôle primordial dont la connaissance de $\vec{A}$ implique la connaissance de tous les grandeurs physiques où :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad \text{II.15}$$

A ces équations nous ajoutons les lois caractéristiques au milieu

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{II.16}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{II.17}$$

La substitution de (II.15) dans (II.12) donne :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial (\vec{\nabla} \wedge \vec{A})}{\partial t} = -\vec{\nabla} \wedge \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \text{II.18}$$

Donc

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{II.19}$$

$\vec{A}$: Vecteur de déplacement magnétique

Ceci implique $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est un champ conservatif, il derive d'un potentiel scalaire électrique (V) tel que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{Grad} V \quad \text{II.20}$$

Donc

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{Grad} V \right) \quad \text{II.21}$$

Cette expression de $\vec{E}$ est en régime variable qui dépend de $\vec{A}$ et $\vec{V}$ à partir de :

$$\begin{array}{ccc} \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} & & \\ \vec{B} = \mu \vec{H} & \longleftrightarrow & \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} & & \end{array}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \frac{1}{\mu} \vec{B} = \vec{j} \quad \text{II.22}$$

On substitue (II.11), (II.12), (II.21)

$$\vec{J}_c = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$$

Et

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} \wedge \frac{1}{\mu} \vec{B} = \vec{J}$$

$$\text{On obtient} \quad \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) = \vec{J}_{ex} + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad \text{II.23}$$

$$\text{Et on a} \quad \vec{E} = -\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{Grad} V \right)$$

Donc

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) = \vec{J}_{ex} - \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{Grad} V \right) + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad \text{II.24}$$

$$\vec{J}_{ex} = \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{Grad} V \right) - \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad \text{II.25}$$

Les expressions $-\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$ et $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ symbolisent les densités des courants induits, ils traduisent le caractère dynamique dans le temps et dans l'espace des phénomènes électromagnétiques, dans le cas où les courants induits par mouvement sont nuls et aussi le $\overrightarrow{Grad} V$ en axisymétrie est nul l'équation (II.25) du système devient :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_{ex} & \text{II.26} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 & \text{II.27} \end{cases}$$

L'équation en termes scalaires, de l'expression (II.26) s'écrit en coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = J_{zex} \quad \text{II.28}$$

II.5 Définition de La Méthode des Éléments Finis

La Méthode des Éléments Finis (MEF) repose sur le principe d'approximation d'un problème formulé sous forme variationnelle dans un espace de dimension infinie, par un problème équivalent défini dans un sous-espace de dimension finie. Cette formulation variationnelle est généralement équivalente à un principe de minimisation de l'énergie, fondé sur le principe des travaux virtuels. La solution approchée ainsi obtenue se présente sous la forme d'une fonction entièrement déterminée par un nombre fini de paramètres. Pour plus de détails sur la FEM et sa méthode de résolution, nous conseillons aux lecteurs de consulter les références suivantes [13, 14, 15].

Les Avantages :

Cette méthode présente plusieurs atouts majeurs qui justifient son recours privilégié dans les problèmes d'électromagnétisme appliqué, notamment :

- La prise en compte rigoureuse des non-linéarités des matériaux.
- Une grande flexibilité d'adaptation aux géométries complexes et irrégulières.
- Un temps de calcul relativement réduit comparativement à d'autres approches numériques.

Inconvénients :

Néanmoins, cette méthode présente certaines limitations qu'il convient de souligner :

- La modélisation des systèmes à domaine ouvert ou de faible épaisseur demeure délicate et manque de précision ;
- Sa mise en œuvre algorithmique s'avère relativement complexe sur le plan de la programmation.

II.6 Définition du logiciel ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell est un solveur de champ électromagnétique pour les machines électriques, les transformateurs, la recharge sans fil, les verrous à aimant permanent, les actionneurs et autres dispositifs mécaniques électriques. Il résout les champs magnétiques et électriques statiques, dans le domaine de la fréquence et variables dans le temps. ANSYS offre également des interfaces de conception spécialisées pour les machines électriques et les convertisseurs de puissance.

Avec ANSYS Maxwell, vous pouvez caractériser avec précision le mouvement transitoire non linéaire des composants électromécaniques et leurs effets sur la conception du circuit d'entraînement et du système de commande. En tirant parti des solveurs de champ électromagnétique avancés de Maxwell et en les reliant de façon transparente à la technologie de simulation des circuits et des systèmes intégrés, vous pouvez comprendre la performance des systèmes électromécaniques bien avant de construire un prototype dans le matériel [14].

Spécifications :

Maxwell ANSYS offre une simulation fiable des champs électromagnétiques à basse fréquence dans les composants industriels. Il comprend des solveurs transitoires magnétiques 3D/2D, électromagnétiques AC, magnétostatiques, électrostatiques, de conduction DC et transitoires électriques pour résoudre avec précision les paramètres de champ, y compris la force, le couple, la capacité, l'inductance, la réluctance et l'impédance.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les équations générales de Maxwell, qui constituent le fondement de tout phénomène électromagnétique. Ensuite nous avons développé le modèle magnétodynamique, adapté aux phénomènes basse fréquence caractéristiques des machines électriques. Nous avons aussi présenté la méthode des éléments finis qui a été choisie pour cette étude.

La méthode des éléments finis est l'un des outils les plus efficaces et les plus généraux de la simulation numérique. Elle est basée sur la discrétisation du domaine dans lequel on désire effectuer la simulation. Cette méthode a été choisie en raison de sa grande facilité à s'appliquer à toute sorte de géométrie et sa capacité de prise en charge des non linéarités des phénomènes physiques.

Chapitre 03 :
Etude et Simulation des
MRV 6/4 et 12/8

III.1 Introduction

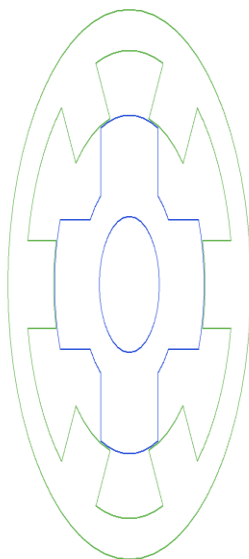
Ce chapitre est consacré à aborder les aspects théoriques et appliqués liés à la modélisation et à la simulation de moteurs à réductance variable avec des structures 6/4 et 12/8, dans le but de mener une étude comparative approfondie entre ces deux structures en termes de comportement électromagnétique et de performances dynamiques. Cette étude est basée sur les résultats de simulations numériques réalisées avec le programme ANSYS Maxwell, qui est l'un des outils informatiques les plus importants spécialisés dans l'analyse des systèmes électromagnétiques. Les variables étudiées dans cette comparaison comprennent : le couple électromagnétique, la puissance mécanique produite, la vitesse de rotation, ainsi qu'un certain nombre d'autres indicateurs qui reflètent les performances globales de chaque moteur.

III.2 La géométrie de la MRV

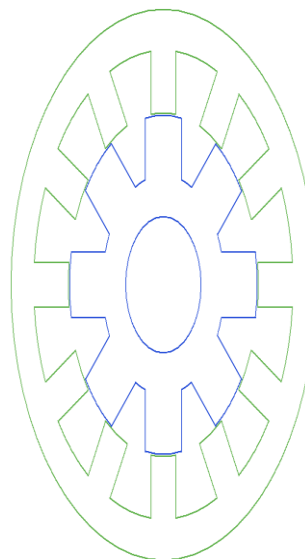
Cet outil (ANSYS Maxwell) a été utilisé pour calculer le champ magnétique et analyser sa distribution dans deux modèles différents de moteurs à réductance variable, qui diffèrent par leur composition structurale :

Le premier modèle : un moteur à réductance variable (6/4) (figure III.1.a).

Le deuxième modèle : un moteur à réductance variable (12/8) (figure III.1.b).



a: MRV 6/4



b: MRV 12/8

Figure III.1: Géométrie du MRV (6/4) et 12/8 pour (ANSYS Inc., 2018).

III.3 Etude et la simulation de la machine à réductance variable 6/4

L'analyse de la machine à réductance variable 6/4 repose sur une modélisation numérique réalisée sous ANSYS Maxwell en deux dimensions. Les résultats issus de cette étude constituent une base d'analyse permettant d'évaluer les performances électromagnétique du moteur d'interpréter le comportement.

III.3.1 Les paramètres de la machine MRV 6/4

Le tableau III-1 présente les paramètres de la machine MRV 6/4.

Les paramètres	Symboles	Valeur et l'unité
Nombre de dents stator	Ns	6
Nombre de dents rotor	Nr	4
Longueur	L	65 mm
Diamètre extérieur du stator	Sout	138 mm
Diamètre extérieur du rotor	Rout	74 mm
Diamètre intérieur du stator	Sinn	75 mm
Diamètre intérieur du rotor	Rinn	30 mm
Epaisseur de la culasse (stator et rotor)	Ythick	9 mm
Puissance de sortie nominale	Pout	250 W
Fréquence	F	50 Hz
Vitesse de référence	N	3500 tr/min
Tension nominale	U	120 V
Facteur d'embrassement (rotor et stator)	β_r, β_s	0.5

Table III.1: Paramètres géométriques de la machine.

III.3.2 Les Courbes caractéristiques :

III.3.2.a Le courant

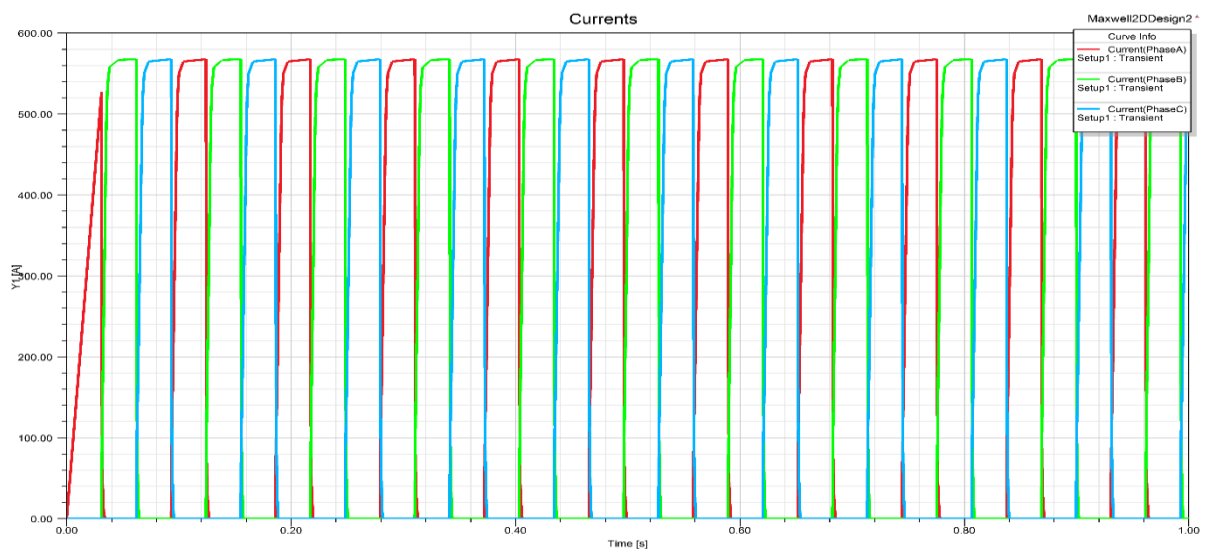


Figure III.2: Les courants en fonction de temps.

La figure III.2 présente les formes d'onde des courants des trois phases (A, B, C) en fonction du temps lors de la fermeture des interrupteurs, le courant statorique croît progressivement sous l'effet d'une tension positive (+VE) jusqu'à atteindre la valeur de consigne à l'ouverture des interrupteurs une tension négative (-VE) est appliquée, provoquant une décroissance du courant jusqu'à l'annulation, le courant maximal atteint est 570 A.

III.3.2.b Le flux

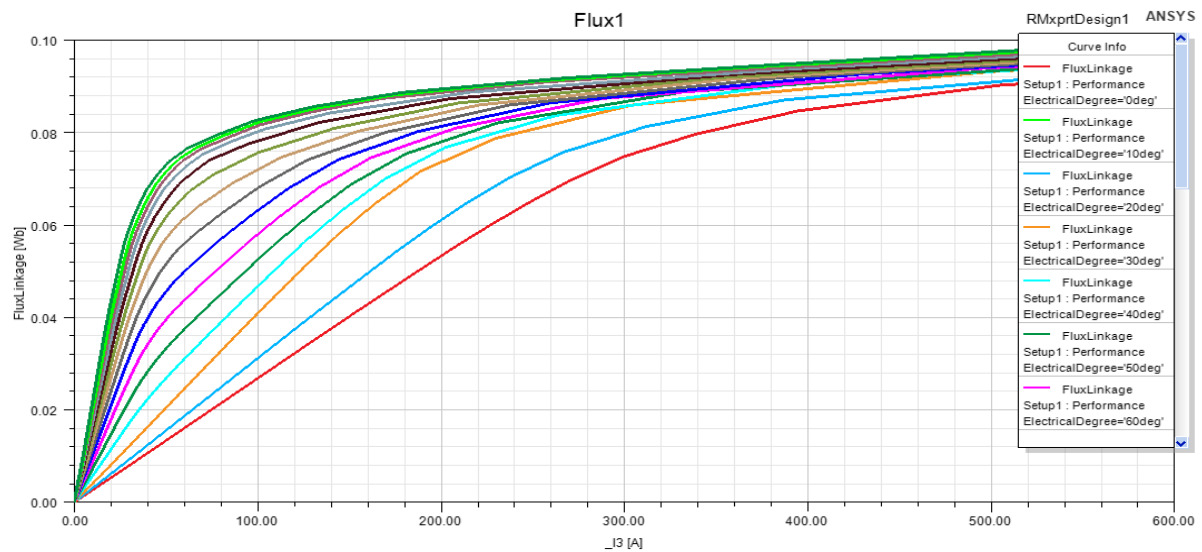


Figure III.3: Flux en fonction de courant pour différentes positions.

La figure III.3 présente l'évolution du flux magnétique pour différentes positions rotoriques et les amplitudes du courant de phase. Les courbes obtenues mettent en évidence les effets de saturation magnétique. La courbe inférieure correspond à la position non alignée, tandis que la courbe supérieure représente la position alignée.

III.3.2.c Le rendement

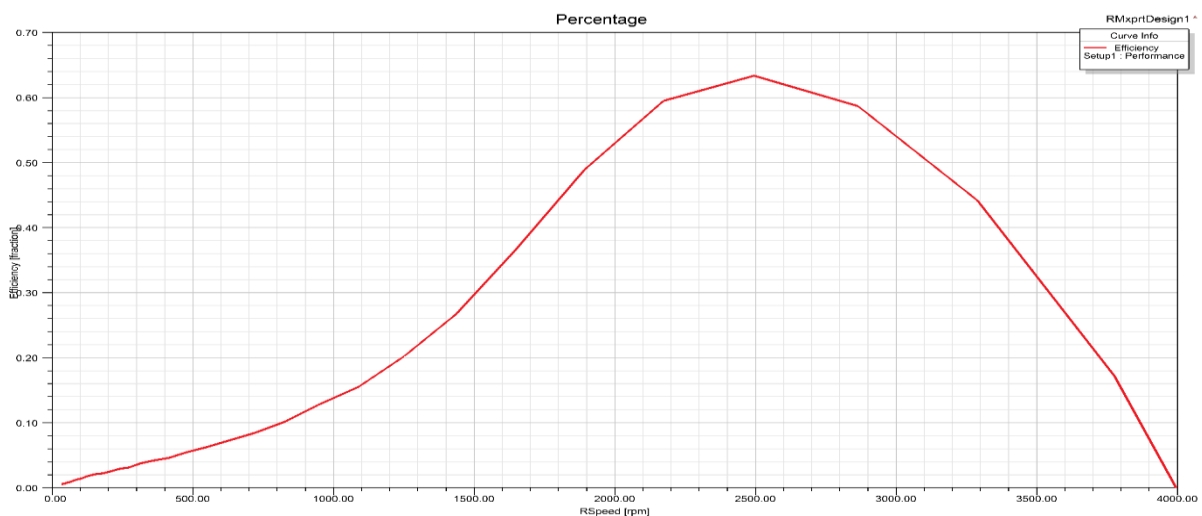


Figure III.4: Le rendement en fonction de la vitesse.

La figure III.4 représente la caractéristique du rendement en fonction de vitesse de la machine. Le rendement maximal relevé est de 64% à 2500 tr/min, ce qui demeure une valeur relativement faible. Cela s'explique par les pertes inégales engendrées par les différents matériaux constituant la machine, qui réduisent ses performances énergétiques.

III.3.2.c La puissance

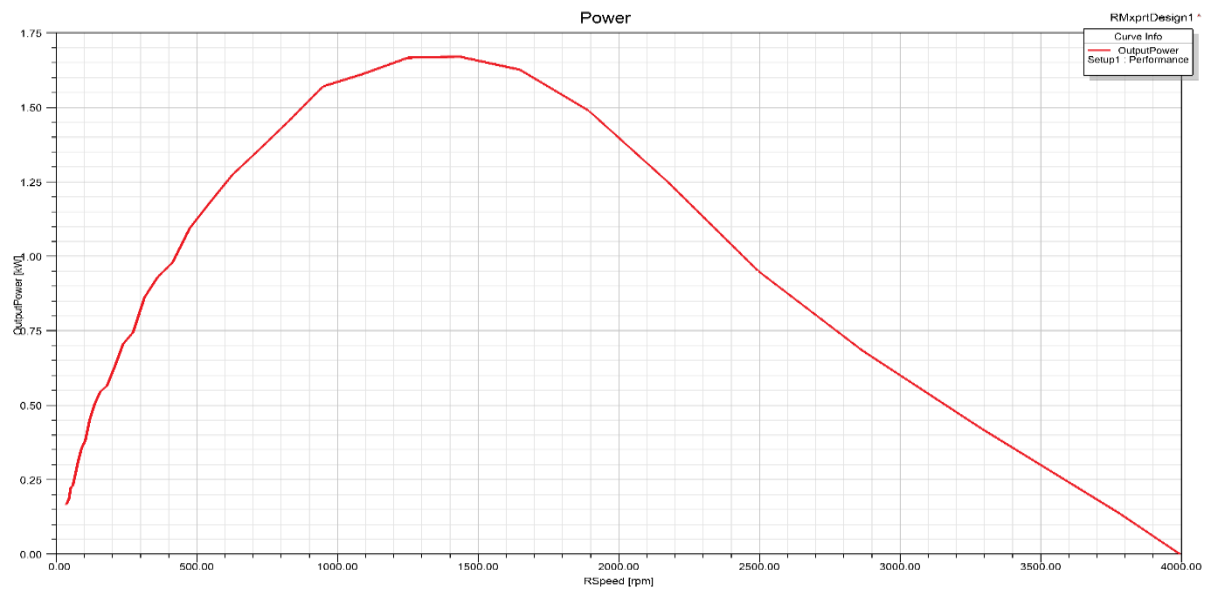


Figure III.5: La puissance de sortie en fonction de la vitesse.

La figure III.5 illustre l'évolution de la puissance de sortie de la MRV en fonction de la vitesse, on constate que la puissance atteint son maximum de 1,67 kW à 1450 tr/min, avant de diminuer progressivement au-delà de cette valeur.

III.3.2.d Le couple électromagnétique

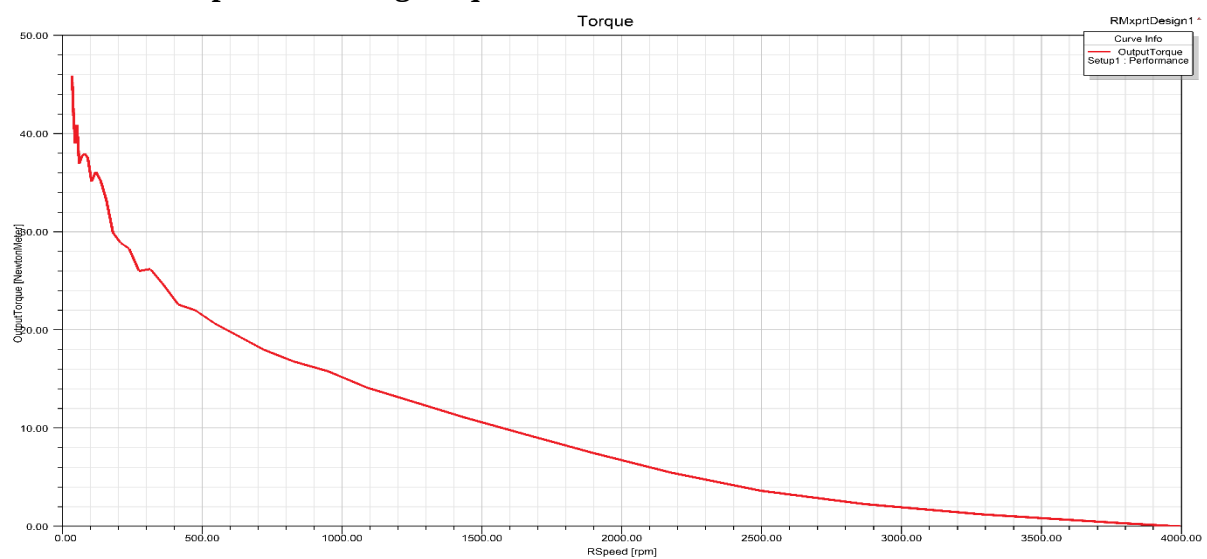


Figure III.6: Le couple de sortie en fonction de la vitesse.

La caractéristique mécanique du couple en fonction de la vitesse est illustrée sur la figure III.6, elle commence à 45.9215 N.m qui représente le couple de démarrage de la machine et diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse.

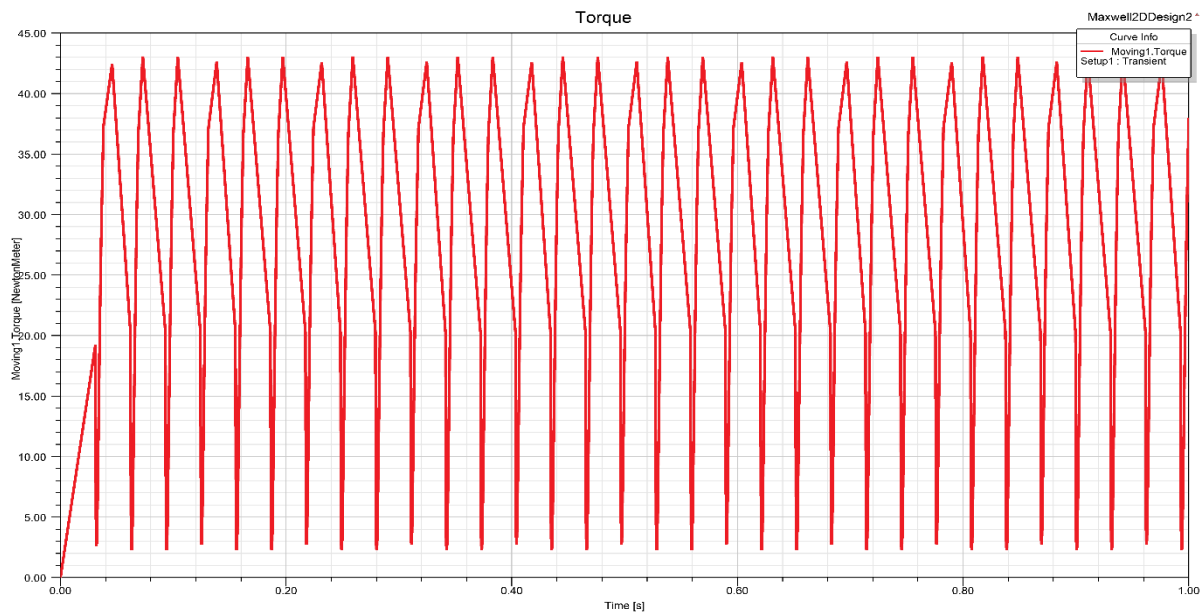


Figure III.7: Le couple en fonction du temps.

La figure III.7 illustre l'évolution du couple moteur qui croît de façon progressive et régulière jusqu'à atteindre son pic maximal avant de se stabiliser avec une légère ondulation résiduelle. Le couple nominale obtenu est de 21,0467 N.m.

III.4 Etude et la simulation de la machine à reluctance variable 12/8

III.4.1 Les paramètres de la machine 12/8

Le tableau III-2 présente les paramètres de la machine MRV 12/8

Les paramètres	Symboles	Valeur et l'unité
Nombre de dents stator	Ns	12
Nombre de dents rotor	Nr	8
Longueur	L	30 mm
Diamètre extérieur du stator	Sout	120 mm
Diamètre extérieur du rotor	Rout	74 mm
Diamètre intérieur du stator	Sinn	75 mm
Diamètre intérieur du rotor	Rinn	30 mm
Epaisseur de la culasse (stator et rotor)	Y thick	9 mm
Puissance de sortie nominale	Pout	100 w
Fréquence	F	50 Hz
Vitesse de référence	N	3500 tr/min
Tension nominale	U	100 V
Facteur d'enlacement (rotor et stator)	β_r, β_s	0.5

Table III.2: Paramètres géométriques de la machine 12/8.

La figure III.8 illustre le modèle en 3D de la machine à reluctance variable 12/8 traité par logiciel ANSYS après la définition des variables.

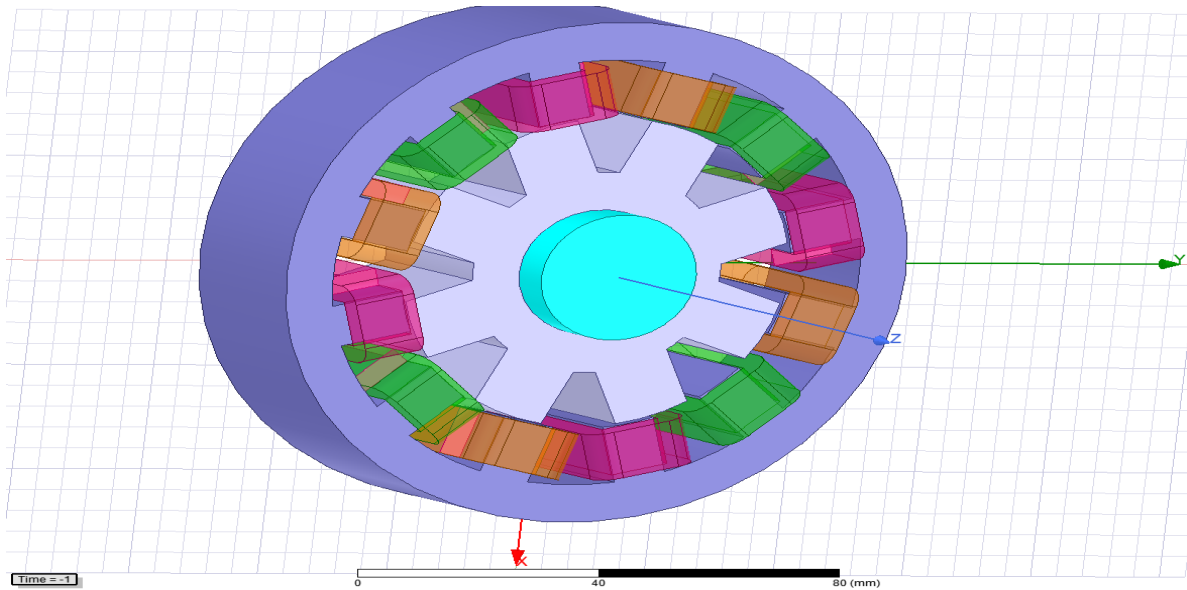


Figure III.8: Modèle MRV 12/8 3D.

III.4.2 Analyse par les éléments finis des modèles MRV

III.4.2.1 Opération de maillage

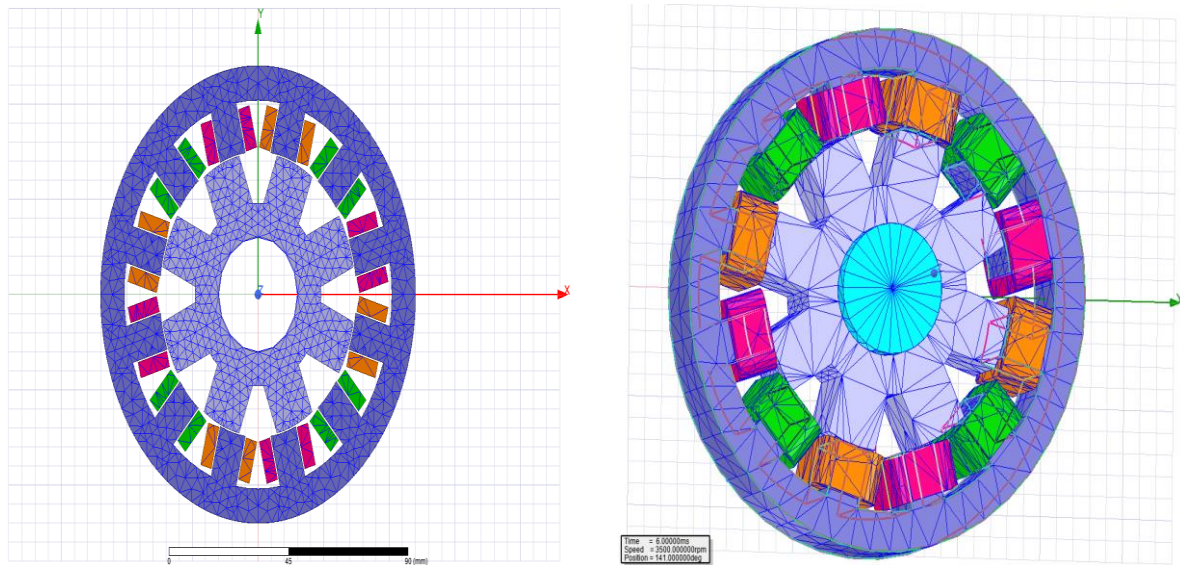


Figure III.9: Discretisation des éléments de maillage 2D et 3D.

La figure III.9 présente la discrétisation 2D et 3D du maillage d'un moteur à réluctance variable, à partir de ces deux modèles nous présenterons notre analyse suivante :

1. Le maillage 2D (à gauche) : Il est composé d'éléments triangulaires. Cette approche est utilisée pour obtenir des résultats rapides lors des premières phases d'optimisation. Elle suppose que le champ magnétique est uniforme sur toute la longueur axiale de la machine, négligeant ainsi les effets de bords.

2. Le maillage 3D (à droite) : Il utilise des éléments volumiques (tétraèdres). Contrairement

au modèle 2D, le maillage 3D est indispensable pour capturer avec précision les flux de fuite aux extrémités (têtes de bobines) et les effets de frange. Bien que plus coûteux en temps de calcul, il est crucial pour une évaluation exacte du couple moteur et de la saturation dans les parties d'extrémité du fer.

3. Détails techniques du maillage

- **Raffinement de l'entrefer** : On observe un maillage particulièrement dense au niveau de l'entrefer (la zone entre le rotor et le stator). Comme c'est dans cette région que l'énergie électromécanique est convertie et que les gradients de flux sont les plus élevés, un maillage fin est impératif pour garantir la précision du calcul du couple.
- **Adaptation au flux** : Le logiciel utilise un processus de maillage adaptatif, augmentant la densité des éléments dans les zones de forte induction magnétique, comme les cornes polaires, afin de mieux représenter les phénomènes de saturation locale.

III.4.2.2 Le flux magnétique

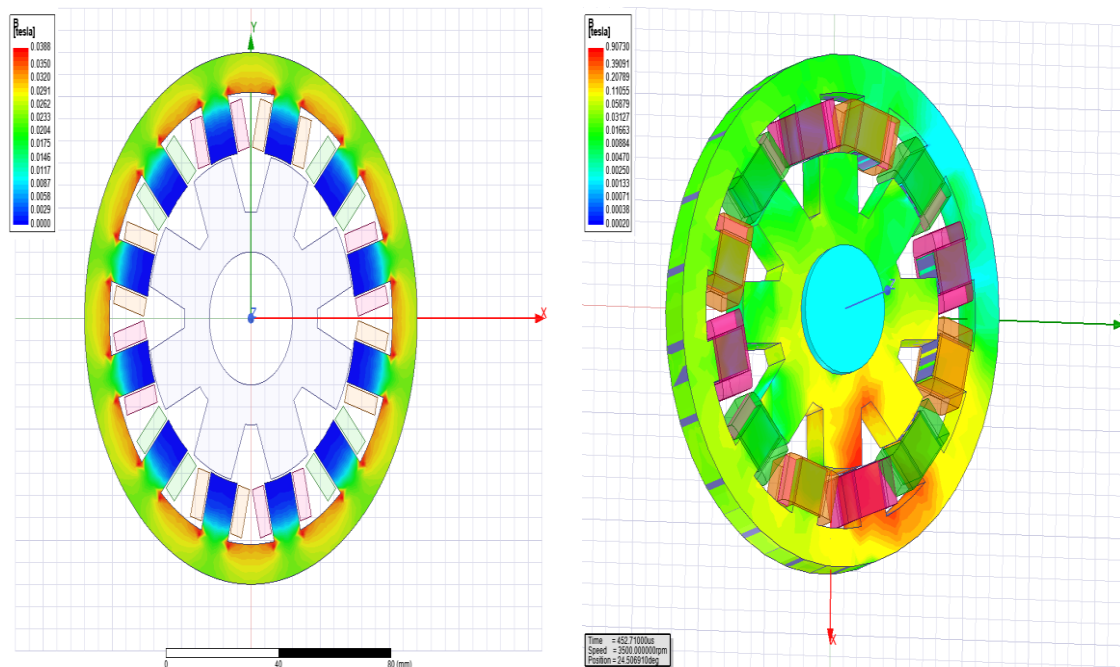


Figure III.10: Le flux magnétique 2D et 3D.

1. La Simulation 2D (Vue en coupe)

Elle montre la distribution du champ magnétique sur une section transversale du moteur.

- **Interprétation des couleurs** : Le gradient de couleur est l'indicateur de l'intensité.
- **Zones Rouges** : Représentent les zones où l'induction magnétique est la plus forte (proche de la saturation du fer). C'est là que la force d'attraction entre le stator et le rotor est maximale.
- **Zones Bleues** : Indiquent une faible intensité de champ.

2. La Simulation 3D (Vue volumétrique)

Elle offre une représentation plus complète et réaliste du comportement magnétique dans tout le volume du moteur. Elle permet d'analyser les effets de bord (aux extrémités du rotor et du stator) que la vue 2D ne peut pas montrer.

III.4.2.3 Les linges de champ magnétique

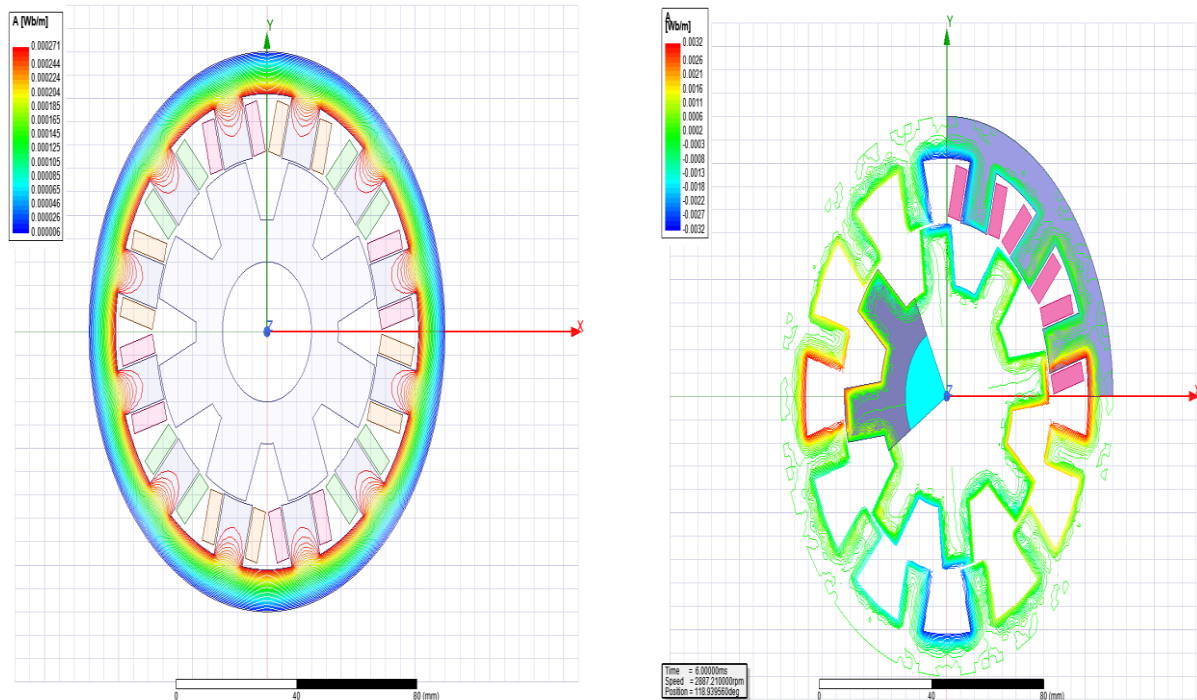


Figure III.11: les lignes de flux 2D.

Analyse de la Figure III -11 :

La figure III.11 montre le potentiel vecteur magnétique ($\vec{A}$). Nous pourrions décrire ce qui suit:

- **Les lignes vertes** : Elles représentent le chemin physique que suit le flux magnétique. Plus ces lignes sont serrées (proches les unes des autres), plus l'intensité du champ magnétique est élevée à cet endroit.
- **L'alignement** : On voit que les lignes tendent à passer par le rotor. C'est le principe de base de ce moteur : le rotor tourne pour s'aligner avec ces lignes afin d'offrir le chemin le plus facile (réluctance minimale) au flux.

III.4.3 Les Courbes caractéristiques :

III.4.3.a Inductance électromagnétique

La courbe de la figure III-12 décrit le comportement de l'inductance en fonction de la position angulaire du rotor par rapport au stator. Elle met en évidence deux caractéristiques fondamentales :

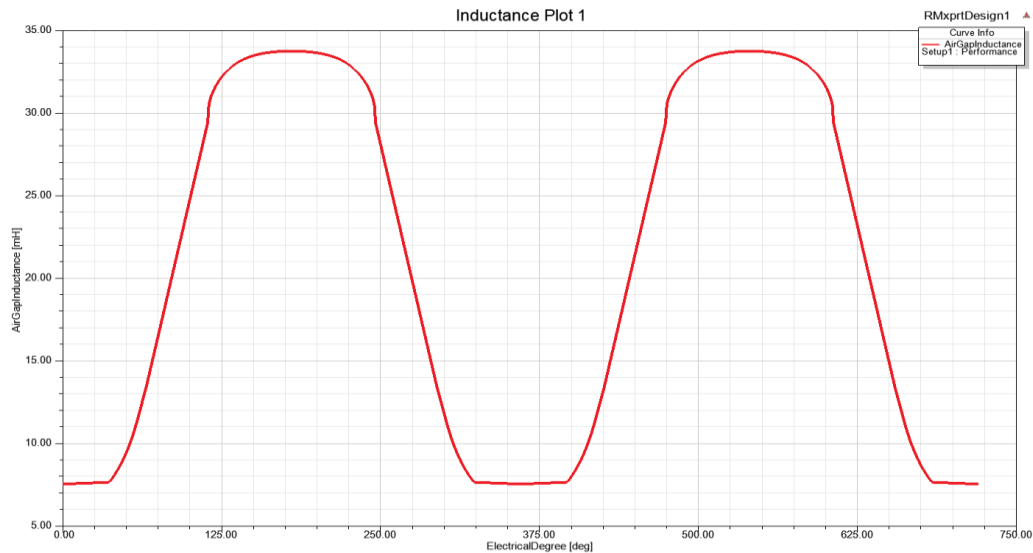


Figure III.12: Inductance en fonction de la position en degré électrique.

- **Inductance maximale** : Cette valeur est atteinte lorsque le rotor se trouve en position de conjonction, ce qui correspond à un alignement parfait des axes magnétiques du rotor et du stator, engendrant ainsi une réluctance magnétique minimale dans le circuit.
- **Inductance minimale** : Cette valeur est obtenue lorsque le rotor occupe la position d'opposition, c'est-à-dire lorsque les axes magnétiques sont perpendiculaires, ce qui entraîne une réluctance magnétique maximale et par conséquent, une diminution significative du flux magnétique.



Figure III.13: Tensions induites en fonction de temps.

La figure III.13 présente l'évolution temporelle des tensions des trois phases (A, B, C) de la machine. On observe des formes d'onde de type créneau périodique, alternant entre une tension positive de +200 V et une tension négative de -200 V avec un déphasage régulier entre les trois phases caractéristiques du mode de commutation de MRV.

III.4.3.b Le courant

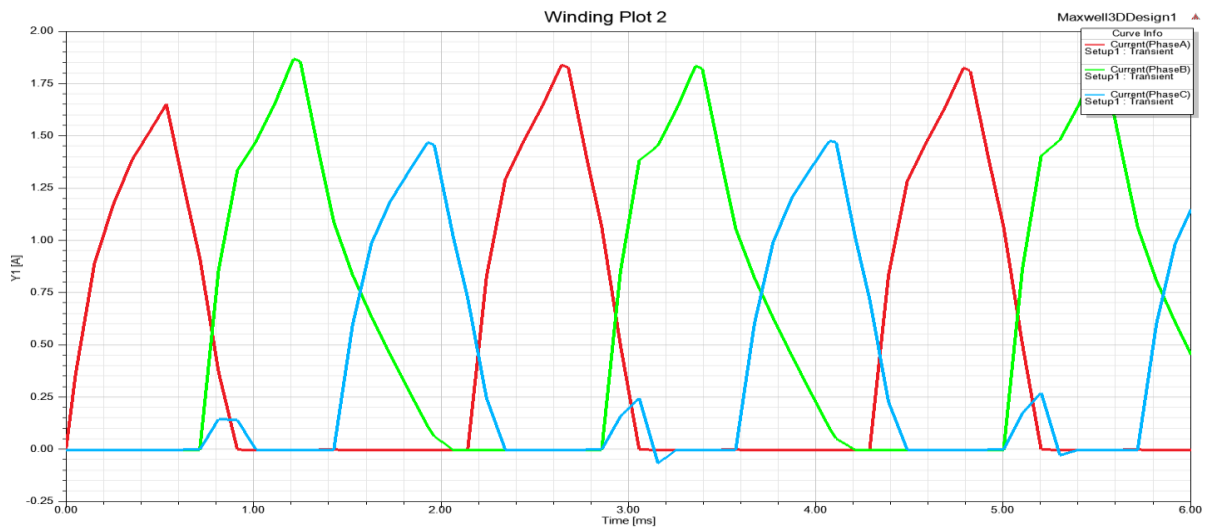


Figure III.14: Les courants en fonction du temps.

La figure III.14 présente les courants des trois phases (A, B, C) en fonction du temps. On observe que les trois courants se succèdent de manière périodique et décalée, avec une forme triangulaire caractéristique. Le courant de chaque phase monte d'environ 1,75 A, puis redescend rapidement à zéro, assurant ainsi une alimentation séquentielle des phases de MRV.

III.4.3.c Le flux

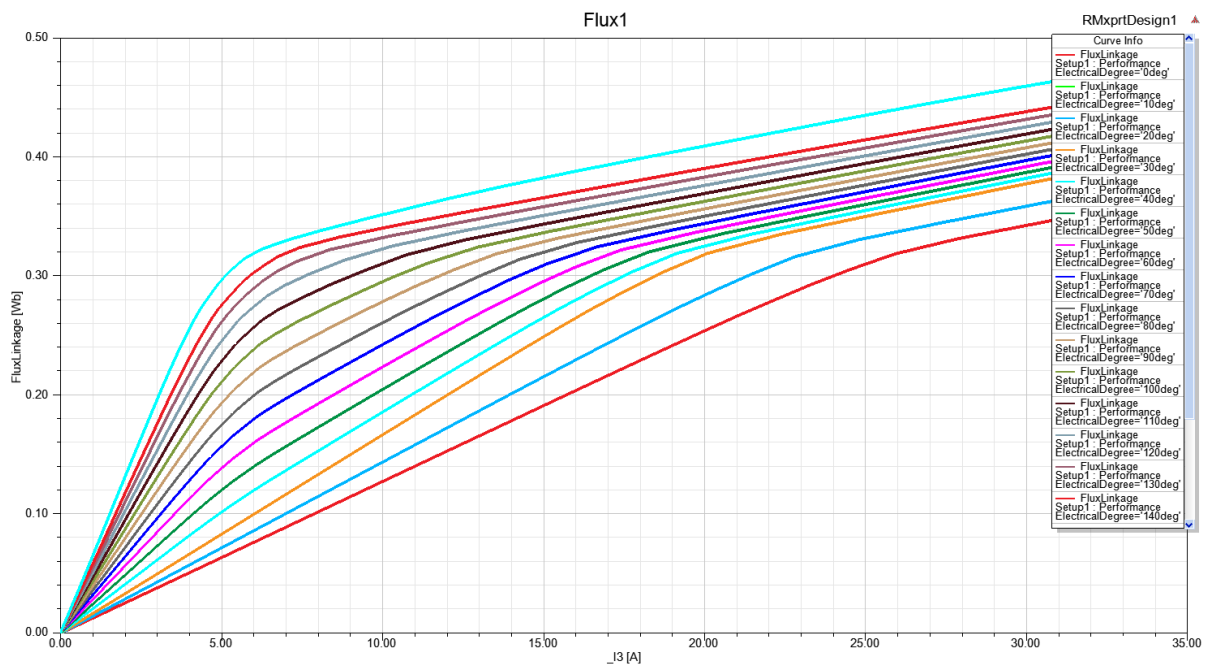


Figure III.15: Le flux en fonction du courant.

La figure III.15 illustre les caractéristiques du flux magnétique en fonction du courant pour différentes positions du rotor. L'ensemble des courbes part d'un point commun à l'origine puis diverge progressivement révélant une zone linéaire et d'une saturation magnétique marquée pour les positions alignées.



Figure III.16: Le flux en fonction du temps.

La figure III.16 montre le flux magnétique des trois phases en fonction du temps. Les courbes obtenues révèlent un comportement périodique avec un déphasage régulier entre les phases. Le flux atteint une valeur maximale d'environ 0,13 Wb et une valeur minimale de -0,06 Wb, traduisant les variations de réluctance liées aux positions successives du rotor.

III.4.3.d Le couple

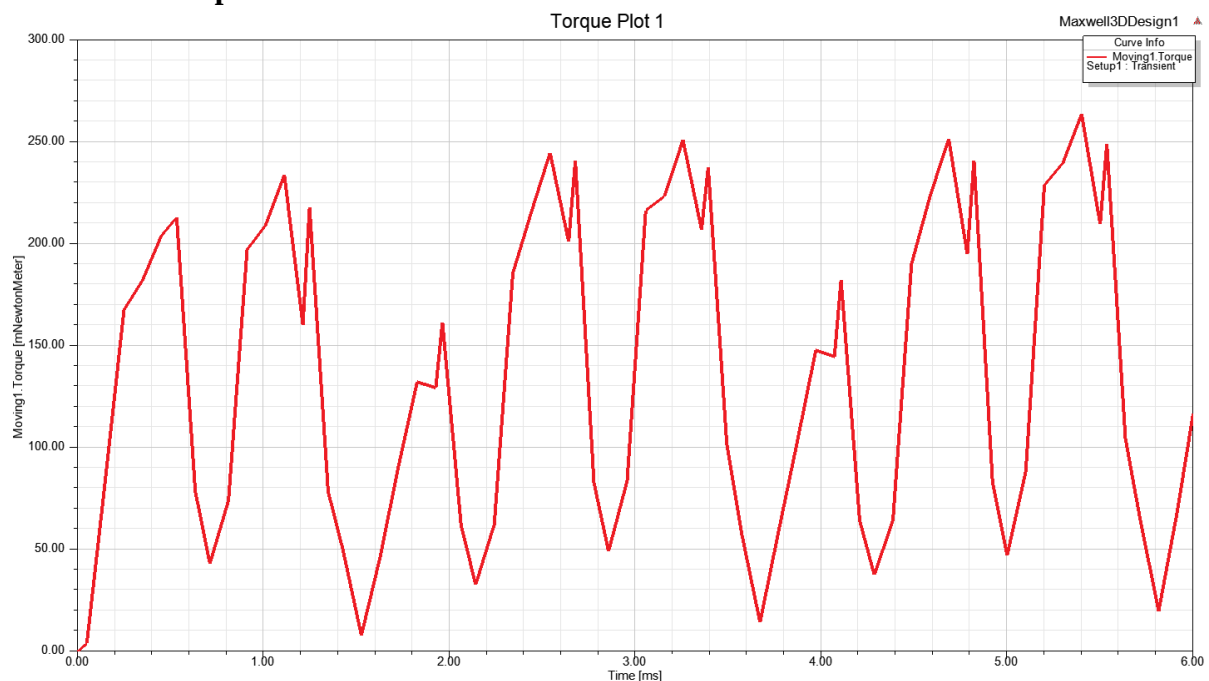


Figure III.17: Le couple en fonction de temps.

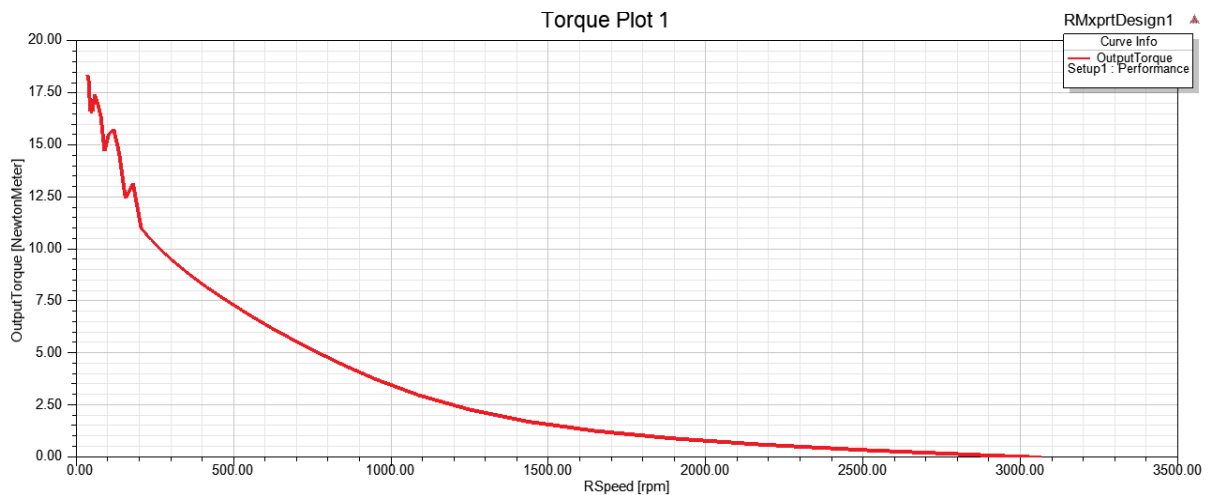


Figure III.18: Le couple de sortie en fonction de la vitesse.

La figure III.17 montre la variation du couple de la MRV. La courbe obtenue présente des ondulations périodiques importantes avec des pics atteignant environ 250 N.m et des creux avoisinant 0 N.m. Ce comportement est inhérent à la structure de la machine à réluctance variable, où la production de couple résulte de la commutation successive des phases statoriques.

La relation entre le couple et la vitesse est illustrée sur La figure III.18, car Le couple commence à une valeur maximale d'environ 18 N.m à vitesse nulle puis diminue progressivement et de manière continu avec l'augmentation de la vitesse de rotation, jusqu'à atteindre une valeur quasi nulle aux alentours de 3500 tr/mn.

III.4.3.e La puissance

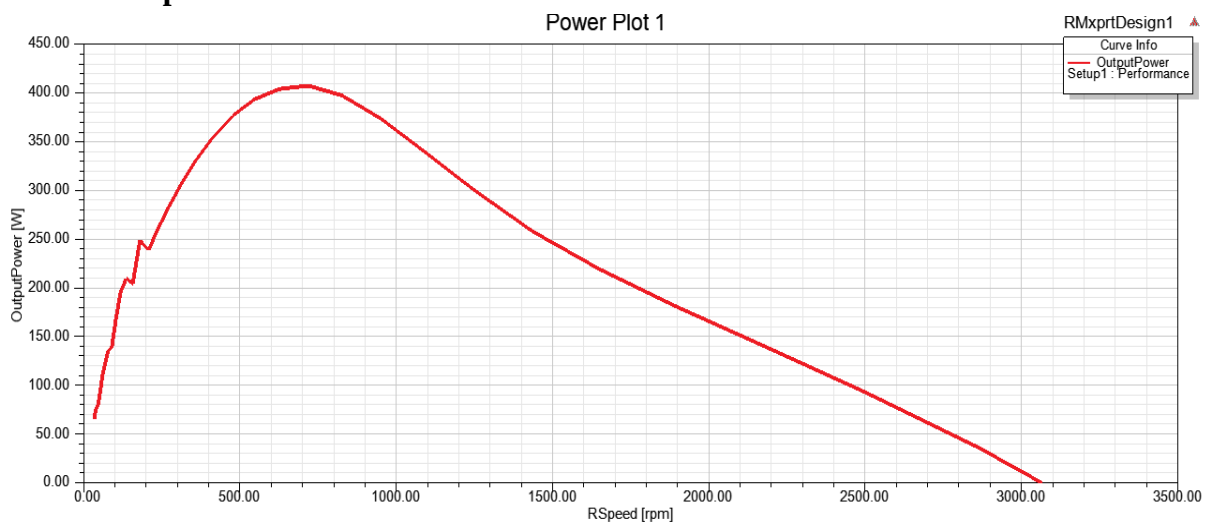


Figure III.19: La puissance en fonction de la vitesse.

D'après La figure III.19 la puissance de sortie de la MRV atteint son maximum d'environ 400 W à 1000 tr/min, point qui représente la plage de fonctionnement optimal de la machine. Au-delà de cette vitesse, la puissance décroît progressivement indiquant une dégradation des performances liée aux pertes croissantes à haute vitesse.

III.4.3.f Le rendement

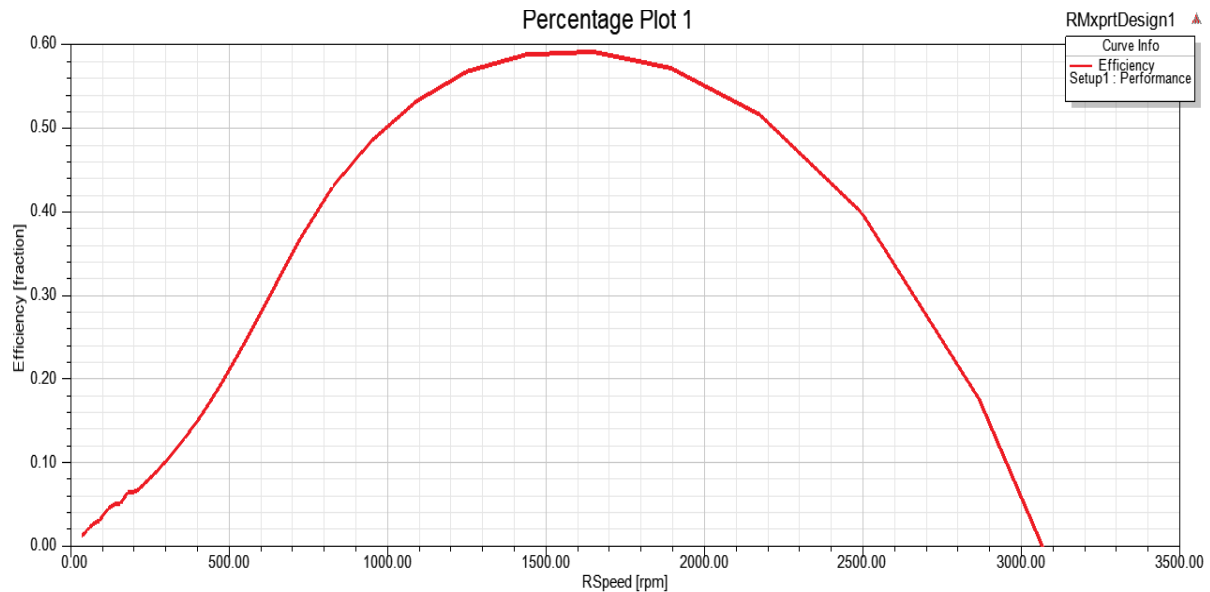


Figure III.20: Le rendement en fonction de la vitesse.

La figure III.20 illustre l'évolution du rendement de MRV en fonction de la vitesse. La courbe montre un rendement maximal de 60% atteint autour de 1500 à 2000 tr/min. La décroissance observée de part et d'autre du point optimal traduit l'augmentation des pertes fer aux hautes vitesses et des pertes cuivre aux faibles vitesses.

III.5 Comparaison entre les deux moteurs à reluctance variable

1. Par le courant : (voir figure III.2 et figure III.14)

Les formes d'ondes du courant de bobinage des deux machines présentent une allure triangulaire et séquentielle sur les trois phases (A, B, C). Cependant, des différences notables sont observées entre le MRV 12/8 et le MRV 6/4. Dans le MRV 12/8, l'amplitude maximale du courant de bobinage atteint environ 1,75 A, avec un décalage temporel bien défini entre les phases sur une plage de 0 à 6 ms. Ce décalage traduit une commutation ordonnée et un chevauchement limité entre les phases, ce qui garantit une meilleure distribution du courant magnétique et une conversion électromagnétique plus efficace. En revanche, dans le MRV 6/4, la réduction du nombre de pôles entraîne un chevauchement plus important entre les phases, ce qui génère des interférences interphases et rend la distribution du courant de bobinage moins régulière et plus difficile à contrôler.

2. Par le rendement: (voir figure III.4 et figure III.20)

Les résultats indiquent que le MRV 12/8 atteint progressivement des valeurs de rendement plus élevées sur une plage de vitesse plus large, allant jusqu'à 4000 tr/min, par rapport au MRV 6/4 limité à 3500 tr/min. À des vitesses inférieures à 1800 tr/min, les deux courbes présentent un comportement similaire avec une montée progressive du rendement.

À des vitesses supérieures à 2000 tr/min, la courbe de rendement du MRV 12/8 diminue progressivement mais reste supérieure à celle du MRV 6/4, avec un écart de rendement maximal d'environ 5% à 6% en fraction. Cette différence s'explique par l'augmentation des

pertes dynamiques et aux pertes dues aux courants de Foucault, ainsi qu'aux interférences électromagnétiques qui sont affectées par la conception géométrique du rotor et la configuration des enroulements statoriques.

Le MRV 12/8 atteint un rendement de pointe d'environ 62% à 63% aux alentours de 2000 tr/min, tandis que le MRV 6/4 plafonne à 57% vers 1800 tr/min, ce qui témoigne d'une meilleure exploitation des propriétés magnétiques dans la configuration 12/8 grâce à son nombre de pôles plus élevé

3. Par le couple : (voir figure III.7 et figure III.17)

Après avoir comparé les courbes de couple des deux moteurs à reluctance variable MRV 12/8 et MRV 6/4, obtenues par simulation sous Maxwell 3D, on observe des différences notables en termes d'amplitude, de forme et de stabilité du signal.

La figure III.7, correspondant au MRV 12/8, présente un signal de couple régulier sous forme d'impulsions périodiques en dents de scie, avec un retour systématique à zéro entre chaque pic. L'amplitude maximale atteint environ 45 N, sur une durée totale de simulation d'environ 1,8 s. Cette régularité reflète une commutation bien contrôlée des phases, grâce au nombre élevé de pôles statoriques qui assure une meilleure continuité du couple et une distribution plus uniforme des efforts magnétiques.

La figure III.17, correspondant au MRV 6/4, représente le couple sur une fenêtre temporelle plus courte (environ 6 ms), avec une amplitude atteignant jusqu'à 300 N.m. La courbe présente des pics doubles et une forme plus complexe et irrégulière, typique de l'ondulation de couple liée à la géométrie du moteur. Contrairement au MRV 12/8, le couple ne revient pas à zéro entre les cycles, ce qui traduit la présence d'un couple résiduel et des fluctuations plus importantes dues au nombre réduit de pôles.

Ces résultats montrent que l'augmentation du nombre de pôles statoriques dans le MRV 12/8 contribue à améliorer la stabilité du couple, à réduire les ondulations et à offrir un comportement dynamique plus régulier. En revanche, le MRV 6/4, avec son nombre de pôles plus faible, présente des interactions magnétiques plus localisées, ce qui engendre une ondulation de couple plus marquée et un contrôle plus difficile. La réduction de ces fluctuations dans le MRV 6/4 constitue un axe d'amélioration important pour optimiser ses performances.

III.6 Application industrielles de ce type moteur 12/8

Le moteur à reluctance variable (MRV) 12/8, d'une puissance de 100W et opérant à 3500 tr/min, est un moteur électrique relativement compact, caractérisé par sa robustesse et sa capacité à fournir une vitesse de rotation modérée à élever. Ces attributs le rendent particulièrement adapté à une série d'applications industrielles légères ou de précision.

Voici quelques exemples d'applications :

Outils de précision et de micro-usinage légers:

- Petites machines de gravure, outils rotatifs de précision pour la bijouterie ou l'électronique, micro-perceuses.
- Convient pour des opérations à petite et moyenne échelle nécessitant une vitesse de rotation contrôlée et une bonne précision de coupe.

Pompes et agitateurs compacts:

- Petites pompes de circulation d'eau ou d'huile pour systèmes de refroidissement, pompes de dosage pour l'industrie chimique légère, agitateurs pour réacteurs de laboratoire.
- Idéal pour les systèmes de transfert et de mélange de fluides où la fiabilité, la durée de vie et le contrôle de débit sont des critères importants.

Ventilateurs et souffleries miniatures:

- Ventilateurs de refroidissement pour armoires électroniques, petits extracteurs d'air pour environnements confinés, souffleries pour applications domestiques légères ou petits équipements industriels.
- Utilisé pour la ventilation et le refroidissement, bénéficiant de la robustesse du MRV et de sa capacité à opérer à vitesse constante.

Petits robots et actionneurs industriels:

- Actionneurs pour les articulations de petits robots utilisés dans l'assemblage de précision, les pinces robotiques, ou les systèmes de "Pick-and-place".
- Utilisé dans les industries nécessitant des mouvements rapides, précis et des opérations répétitives, où la simplicité du rotor sans balais est un avantage.

Équipements de laboratoire:

- Centrifugeuses de petite capacité, agitateurs magnétiques à vitesse variable, mélangeurs de laboratoire ou appareils d'analyse.
- Idéal pour la recherche et le développement nécessitant une rotation rapide et un contrôle précis de la vitesse.

Appareils électroménagers et outils portatifs :

- Moteurs pour certaines brosses rotatives, petits compresseurs d'air pour l'outillage de modélisme, ou systèmes de motorisation auxiliaires.
- Ces applications bénéficient de la combinaison d'une puissance modérée et d'une bonne efficacité, permettant une performance fiable pour des tâches exigeant une rotation rapide et constante.

III.7 Exemple d'application d'un moteur MRV 12/8 pour le pompage de liquide de refroidissement (dans Véhicules Électriques)

Pour dimensionner une micro-pompe centrifuge pour un moteur avec une puissance mécanique de sortie de **100 W** et une vitesse de **3500 tr/min**, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques de débit et de hauteur de refoulement. Voici les étapes de calcul :

1. Calcul de la puissance hydraulique disponible

La puissance hydraulique réelle dépend du rendement de la pompe choisie (η_p).

Considérations sur le rendement :

Pour cette étude, nous utilisons les valeurs suivantes :

- Rendement de la micro-pompe (η_p) : 65%

Puissance hydraulique disponible :

La puissance hydraulique fournie au fluide est :

$$P(h) = P(m) \times \eta p$$

III.1

$$P(h) = 100 \text{ W} \times 0.65$$

$$P(h) = 65 \text{ W}$$

2. Détermination du débit et de la hauteur de refoulement

Nous utilisons la formule fondamentale de l'hydraulique :

$$P(h) = (Q \times H \times \rho \times g)$$

III.2

Où :

- **Q** : Débit en (m^3/s)
- **H** : Hauteur de refoulement en (m)
- **ρ** : Masse volumique (Eau = $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)
- **g** : Gravité ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)

a. Calcul de la hauteur pour un débit fixe :

Supposons un débit de **25 l/min**, soit $0.000416 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$H = \frac{P(h)}{Q \times \rho \times g}$$

III.4

$$H = \frac{65}{0.000416 \times 1000 \times 9.81} = 15.93 \text{ m}$$

Soit, pour un débit de 25 l/min, la hauteur maximale est d'environ 15.93m.

b. Calcul du débit pour une hauteur fixe :

Supposons une hauteur de refoulement de **H = 10 m**.

$$Q = \frac{P(h)}{H \times \rho \times g}$$

III.5

$$Q = \frac{65}{10 \times 1000 \times 9.81} = 0.000662 \text{ m}^3/\text{s}$$

Soit, pour une hauteur de 10 mètres, le débit maximal est d'environ $Q \approx 39.75 \text{ l/min}$

3. Conclusion

Pour ce moteur de 100W à 3500 tr/min, les performances hydrauliques sont :

- **Débit de 25 l/min** avec une hauteur de **15.93 m**.
- **Hauteur de 10 m** avec un débit de **39.75 l/min**.

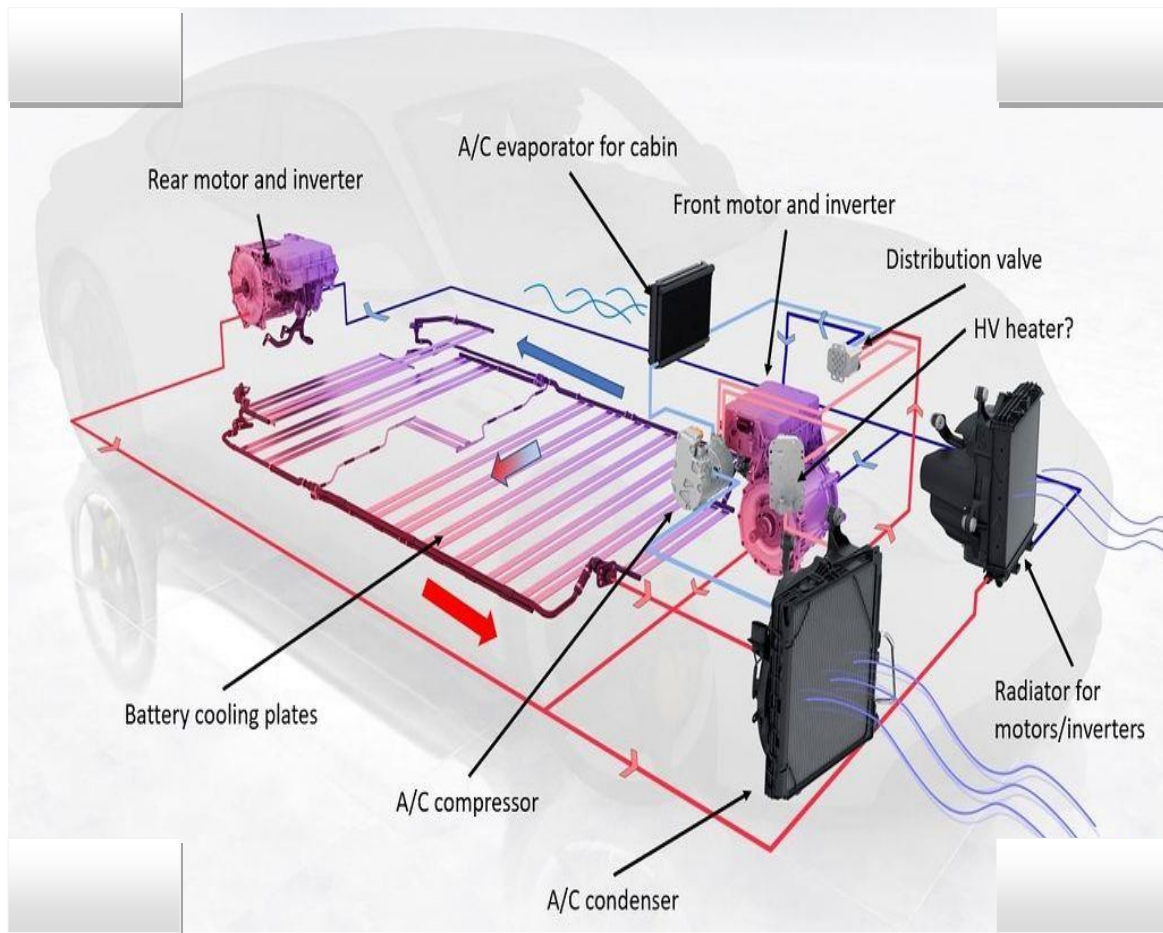


Figure III.21: La structure fonctionnelle du système de climatisation et de réfrigération dans une voiture électrique.

4. Recommandations

- a. **Vitesse de rotation :** À 3500 tr/min, nous devrions assurer que la garniture mécanique de la pompe supporte cette vitesse sans échauffement excessif.
- b. **Couple de démarrage :** Le MRV 12/8 possède un excellent couple de démarrage, ce qui est idéal pour vaincre l'inertie de la colonne d'eau au lancement.
- c. **Cavitation :** nous devrions vérifier aussi que la pression à l'entrée est suffisante pour éviter la cavitation à haute vitesse.

III.8 Conclusion

Ce travail a présenté une étude comparative approfondie entre les configurations de MRV 6/4 et 12/8, en se basant sur des paramètres de conception et des conditions de fonctionnement identiques. L'objectif était d'analyser l'impact de la géométrie du stator et du rotor sur les performances globales du système.

Les résultats obtenus démontrent que l'augmentation du nombre de pôles dans la structure 12/8 favorise une meilleure distribution du flux magnétique, ce qui se traduit par une réduction significative de l'ondulation du couple et une amélioration de la densité de puissance par rapport au MRV 6/4. Cependant, cette configuration plus complexe entraîne une augmentation des pertes par courants de Foucault ainsi qu'une sollicitation accrue de l'électronique de puissance due à une fréquence de commutation plus élevée. En revanche, bien que la structure 6/4 présente une conception plus simple et un coût de fabrication réduit, elle affiche des performances dynamiques plus limitées, notamment en raison d'une ondulation de couple plus prononcée à basse vitesse.

En conclusion, cette étude a permis de mettre en évidence que le choix entre une structure 6/4 et 12/8 dépend étroitement du compromis souhaité entre la simplicité de la commande, le coût du convertisseur et les exigences de stabilité du couple pour l'application visée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail, nous avons conduit une étude comparative approfondie entre deux topologies de machines à réluctance variable (MRV), à savoir la MRV 6/4 et la MRV 12/8, en nous appuyant sur des simulations numériques réalisées sous le logiciel ANSYS Maxwell. L'objectif central de cette étude était d'évaluer et de confronter les caractéristiques électromagnétiques et dynamiques de ces deux architectures, afin de dégager leurs domaines d'application privilégiés et leurs limites respectives.

Les résultats obtenus ont mis en lumière que le nombre de pôles constitue un paramètre fondamental qui gouverne l'ensemble du comportement de la machine. La MRV 12/8, grâce à son nombre élevé de pôles, offre une fréquence de commutation plus importante, ce qui se traduit par une ondulation de couple nettement réduite, une meilleure continuité du couple électromagnétique et une régularité mécanique supérieure. Ces propriétés en font une candidate de choix pour les applications exigeant une haute précision de contrôle et un fonctionnement silencieux. En contrepartie, sa conception plus complexe implique une gestion plus rigoureuse des commutations et une électronique de puissance plus sophistiquée. La MRV 6/4, quant à elle, se distingue par sa simplicité structurelle, sa robustesse mécanique et sa facilité de mise en œuvre, ce qui justifie son utilisation répandue dans les systèmes industriels standards.

Sur le plan électromagnétique, l'analyse comparative des distributions de flux, de la densité d'induction dans les dents du stator et du rotor, ainsi que des pertes fer, a révélé des comportements distincts entre les deux topologies. La MRV 12/8 exploite de manière plus homogène le circuit magnétique, réduisant les zones de saturation locale et améliorant le rendement global de la conversion d'énergie. La MRV 6/4, bien que présentant des niveaux de saturation plus marqués à forte charge, conserve l'avantage d'une inductance par phase plus élevée, favorable au développement d'un couple moyen significatif avec un bobinage simplifié.

En fin, ce travail nous a permis d'établir une vision claire et nuancée des atouts et des limites comparatifs des MRV 6/4 et 12/8. Si la MRV 6/4 demeure la référence en termes de simplicité et d'accessibilité technologique, la MRV 12/8 s'impose comme une solution à privilégier dès lors que les contraintes applicatives exigent une qualité de couple élevée et un fonctionnement à vitesse variable performant. Ces résultats ouvrent la voie à des perspectives de recherche prometteuses, notamment l'intégration de commandes intelligentes et l'optimisation géométrique multi-objectifs, en vue d'applications exigeantes telles que la traction électrique, les énergies renouvelables ou les systèmes embarqués à haute efficacité énergétique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Moreau, « Modélisation, Conception et Commande de GRV », Thèse Doctorat, Univ. Nantes, 9 Dec 2005.
- [2] Dadi Rachida, « étude et simulation du modèle non linéaire d'un moteur a réluctance variable a double saillance », mémoire de thèse de magister, faculté de génie électrique, département d'électrotechnique, université des sciences et de la technologie d'Oran 2006.
- [3] Mert Mokukcu, « Optimisation énergétique d'un véhicule hybride ». Université Paris saclay, France, 2018
- [4] Slah Farhani, « Conception et réalisation des convertisseurs de puissance dédiés aux véhicules électriques ». Thèse de doctorat, Université de Tunis, 2019
- [5] B. Multon, « Moteurs Pas-a-Pas », E. N.S. Cachan, mai 2004, ISBN : 2-909968-64-2
- [6] B. Multon, « Principe et éléments de dimensionnement des machines à réluctance variable à double saillance autopilotées », Journées ELT club EEA, Belfort 25-26 Mars 1993.
- [7] I.MOHAMED, H.REHAOULIA and M.AYADI, « Design and modeling of a linear switched reluctance actuator for biomedical applications », International journal Of Physical Sciences, Vol.6(22), pp.5171-5180, October 2011.
- [8] M.Cheballah, M .Hachoud , « Synthèse d'optimisation d'une MRVDS 6/4 », Thèse de Mémoire, Univ. Tizi ousou, 2012.
- [9] Michel Perrin et Jean Pierre Les bases de l'électromagnétisme.
- [10] CHOUAIB LABIOD, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », Thèse Magiste, Univ. Biskra, 2014.
- [11] M.Rezgui Rezika, « Etude d'une machine à reluctance variable linéaire par la méthode des éléments finis », Thèse Mémoire, Univ. Tizi ousou, 2011.
- [12] L.NAIT KADI, A.NAIT OUSLEMENE « Mise on oeuvre du couplage magnétothermique pour l'étude de la répartition de la température en utilisant la méthode des élément finis : application au dispositifs de chauffage par induction et lanceurs électromagnétique » Mémoire d'ingénieur, université Mouloud Mammeri de Tizi-ousou, 2002.
- [13] E.Goncalvès da Silva, « Méthodes et Analyse Numériques. Engineering school », Institut Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [14] T. W. Preston, A. B. J. Reece, P. S. Sangha, « Induction motor analysis by time stepping techniques », IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 24, No. 1, pp. 471- 473, January 1988.
- [15] M.Hadjari et L.Flissi « Modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécaniques en régime transitoire en utilisant la méthode des éléments finis avec prise en compte du mouvement ». Mémoire d'ingénieur, promotion 2002, Université MOULOUD MAMMERI, Tizi-Ouzou.
- [16] M. Rosu, P. Zhou, D. Lin, D. M. Ionel, M. Popescu, F. Blaabjerg, V. Rallabandi, and D. Staton, Multiphysics Simulation by Design for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Wiley-IEEE Press, 2017.

- [17] Chouaib LABIOD « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », Thèse de magister, université de Biskra, 12 Mai 2014.
- [18] Serhoud Hichem « Contribution à l'étude de la machine synchrone à réluctance variable », Thèse de magister, université de Batna, 01 juillet 2009.
- [19] TAHI Slimane « Dimensionnement et Optimisation de Machines Synchro-Réluctantes », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2015.
- [20] M.Rezig, «Moteur à Reluctance Variable» Cours Machines spéciales, université de Biskra, 2019-2020.