



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur 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 Électrique**



N° d'ordre : M...../ GE /2025

## **MEMOIRE**

Pour obtenir le diplôme de

### **MASTER EN ELECTROTHERNIQUE**

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

***TOUAHRIA MOHAMMED SALAM  
BELABDI SID AHMED***

#### **Intitulé du sujet**

***Étude comparative sur la conception de la machine MRV 10/4 et 6/4 et la commande en boucle ouverte de la MRV 6/4***

Soutenu le 23/09/2025 devant le jury composé de :

Président : BEKKOUCHE BENAÏSSA Pr Université de MOSTAGANEM

Examineur : OMARI HAMZA MAA Université de MOSTAGANEM

Encadrant : CHAOUCH ABDALLAH Pr Université de MOSTAGANEM

**Année Universitaire 2024/2025**



## **REMERCIEMENTS**

*Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Allah Tout-Puissant, qui nous a accordé la foi, le courage et la patience tout au long de nos années d'étude. Nous remercions également nos familles pour leurs sacrifices et leur soutien constant, qui ont rendu possible l'achèvement de notre parcours académique.*

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadrant, **Dr. CHAOUCH ABDALLAH**, pour ses précieux conseils, son accompagnement et son aide tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury, pour l'intérêt porté à notre recherche, ainsi que pour leurs remarques et suggestions constructives qui ont enrichi notre travail.*

*Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance au chef de département ainsi qu'à l'ensemble de nos professeurs, dont les compétences et l'engagement nous ont guidés et soutenus durant nos études.*

*Nous n'oublions pas de remercier le doyen de la faculté, **Pr. Ghezzar**, ainsi que notre guide, **Pr BEKKOUCHE BENAÏSSA**, pour leur aide et leur disponibilité.*

*Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

**MERCI !**

---

# DÉDICACE



Nous dédions ce modeste travail, aboutissement de plusieurs années d'efforts et de sacrifices À nos chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leurs prières qui ont toujours été notre force.

À nos professeurs, pour leurs efforts, leur patience et leur dévouement tout au long de notre parcours académique. À nos familles, nos amis et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à notre réussite, recevez notre profonde gratitude.

À nos professeurs, pour leur dévouement, leur rigueur et leurs précieux enseignements. Vous avez marqué notre parcours académique et contribué à notre formation aussi bien humaine que scientifique. Recevez toute notre gratitude et notre profond respect.

---

## ملخص:

يُعد محرك الممانعة المبدلة أحد التطبيقات الصناعية الشائعة، حيث تُستخدم نماذج متعددة في مجالات مختلفة، ولكنها تختلف في الأداء، لذا يجب تحديد اختيار النموذج الأولي المناسب وفقاً لمتطلبات التطبيق. في هذه الدراسة، أُجري تحليل مقارن بين محركات الممانعة المبدلة، حيث تم اعتماد نفس الأبعاد والمعلمات وظروف التشغيل في التصميم، ANSYS Maxwell ذات معاملي 4/6 و 4/10 باستخدام برنامج مع تغيير عدد أقطاب الجزء الثابت فقط لتقييم الخصائص المغناطيسية والميكانيكية والكهربائية، ثم درسنا تأثيرها على أداء محركات الممانعة المبدلة، مع التركيز على جوانب متعددة لعزم الدوران، والسرعة، والخسائر المختلفة، والتحليل الكهرومغناطيسي للكثافة، وكثافة التدفق المغناطيسي. وراجعنا الخسائر الكهربائية، وكشفت الدراسة عن اختلافات جوهرية بين الأداء الكهرومغناطيسي لمحركات الممانعة المبدلة، مما يُبرز أهمية تصميمها في تقليل الخسائر وتحسين الكفاءة. وتُظهر النتائج أن أهمية الاختيار بين نوعي المحركات تعتمد على متطلبات التطبيق، سواءً كان يتطلب سرعة وكفاءة عاليتين أو عزم دوران عاليًا. وتُقدم هذه الدراسة نظرة شاملة على تحليل عميق لتصميمات محركات الممانعة المبدلة، مما يدعم السعي نحو تقنيات أكثر كفاءة واستدامة لتحسين الأداء العام للمحركات الكهربائية.

## Abstract:

*The switched reluctance motor (SRM) is one of the common industrial applications where many fields of different models are used, but they differ in performance, thus the selection of the appropriate prototype must be determined according to the application's requirements. In this study, a comparative analysis was conducted between 10/4 and 6/4 switched reluctance motors (SRMs) using ANSYS Maxwell where the same dimensions, parameters, and operating conditions were adopted in the designs and only the number of stator poles were changed to evaluate the magnetic, mechanical, and electrical characteristics. Then we study their effect on the SRMs performance focusing on several aspects of torque, speed, various losses, electromagnetic analysis of intensity, and magnetic flux density. Electrical losses were reviewed, and the study revealed significant differences between the SRMs' electromagnetic performance, highlighting the importance of the SRM design to reduce losses and improve efficiency. The results show that the importance of choosing between the two SRMs depends on the application requirements, whether it requires high speed and efficiency or high torque. This study provides a comprehensive insight into the SRM designs deep analysis, supporting the drive for more efficient and sustainable technology in optimizing the electric motors' overall performance.*

## Résumé:

*Le moteur à réluctance variable (MRV) est une application industrielle courante où de nombreux domaines et modèles différents sont utilisés, mais leurs performances diffèrent. Le choix du prototype approprié doit donc être déterminé en fonction des exigences de l'application. Dans cette étude, une analyse comparative a été réalisée entre des moteurs à réluctance variable (MRV) 10/4 et 6/4 à l'aide d'ANSYS Maxwell. Les dimensions, paramètres et conditions de fonctionnement ont été identiques pour les conceptions, seul le nombre de pôles statoriques ayant été modifié afin d'évaluer les caractéristiques magnétiques, mécaniques et électriques. Nous étudions ensuite leur effet sur les performances des MRV, en nous concentrant sur plusieurs aspects : couple, vitesse, pertes diverses, analyse électromagnétique de l'intensité et densité de flux magnétique. Les pertes électriques ont été examinées et l'étude a révélé des différences significatives entre les performances électromagnétiques des MRV, soulignant l'importance de la conception des MRV pour réduire les pertes et améliorer le rendement. Les résultats montrent que l'importance du choix entre les deux MRV dépend des exigences de l'application, qu'il s'agisse d'une vitesse et d'un rendement élevés ou d'un couple élevé. Cette étude fournit un aperçu complet de l'analyse approfondie des conceptions des MRV, appuyant ainsi la recherche d'une technologie plus efficace et durable pour optimiser les performances globales des moteurs électriques.*

## SOMMAIRE

***Introduction générale***

Introduction générale.....	9
----------------------------	---

***CHAPITRE I : Généralités sur les machines à reluctance variable***

I.1 Introduction.....	12
I.2 Historique.....	12
I.3 Constitution d'Une Machine à Reluctance Variable.....	13
I.4 Principe de fonctionnement.....	14
I.4.a Structure de base d'une MRV.....	14
I.5 Modes d'alimentations.....	15
I.5.a Alimentation en courant unidirectionnel.....	15
I.5.b Alimentation en courant alternatif.....	16
I.6 Avantages, Inconvénients de la MRV.....	16
I.7 Domaine d'application du moteur à réluctance variable.....	17
I.8 Conclusion.....	17

***CHAPITRE II : Modélisation de la machine à reluctance variable***

II.1 Introduction.....	19
II.2 Equations du champ magnétique.....	19
II.3 Méthode des éléments finis.....	19
II.4 Calcul des paramètres électromagnétiques.....	20
II.5 Résultats numériques.....	21
II.5.1 Etude et la simulation de la machine à reluctance variable 6/4.....	21
II.5.1.a Le courant.....	21
II.5.1.b Le flux.....	22
II.5.1.c Le rendement.....	22
II.5.1.d La puissance.....	23
II.5.1.e Le flux avec la position rotor.....	24
II.5.1.f Le couple.....	25
II.5.2 Etude et la simulation de la machine à reluctance variable 10/4.....	26
II.5.2.a Le courant.....	26

II.5.2.b Le flux.....	26
II.5.2.c Le rendement.....	27
II.5.2.d La puissance.....	27
II.5.2.e Le flux avec la position rotor.....	28
II.5.2.f Le couple.....	29
II.6 La comparaison entre les deux Moteurs à reluctance variable.....	30
II.6.a Par le courant.....	30
II.6.b Par le couple.....	30
II.6.b Par le rendement.....	31
II.7 Conclusion.....	31
<b><i>CHAPITRE III : La commande linéaire de la machine à Reluctance Variable 6/4 sous MATLAB-SIMULINK</i></b>	
III.1 Introduction.....	33
III.2 Modèle Linéaire de la MRV.....	33
III.3 Commande du courant par hystérésis.....	35
III.3.1 Variation de couple, vitesse pour l’angle standard.....	35
III.3.2 Variation de couple, vitesse pour l’angle de conduction.....	36
III.3.3 Variation de couple, vitesse pour l’angle de distinction.....	37

***Conclusion générale***

***Annexe***

***Bibliographies***

**Listes des figures**

Figure I.1 Moteur de DAVIDSON (1840 environ)

Figure I.2 Moteur élémentaire de Froment (1845)

Figure I.3 Constitution d'une MRV.

Figure I.4 Machine à réluctance variable ; structure élémentaire

Figure I.5 Les différentes Positions du rotor relatives aux deux réluctances extrêmes.

Figure I.6 Alimentation en courant unidirectionnel.

Figure I.7 Alimentation en courant bidirectionnel.

Figure II.1 Discrétisation par éléments finis en deux dimensions.

Figure II.2.a MRV 6/4

Figure II.2.b MRV 10/4

Figure II.3 (MRV6/4), Figure II.10 (MRV 10/4) : Les courants en fonction de temps

Figure II.4 (MRV6/4), Figure II.11 (MRV 10/4) : flux en fonction de courant

Figure II.5 (MRV6/4), Figure II.12 (MRV10/4) : le rendement en fonction de la vitesse

Figure II.6 (MRV6/4), Figure II.13 (MRV10/4): la puissance de sortie en fonction de la vitesse

Figure II.7 (MRV6/4), Figure II.14 (MRV10/4) : la densité du flux en fonction de position rotor

a- à  $t=0s$

b- à  $t=0.5s$

c- à  $t=1s$

Figure II.8 (MRV6/4), Figure II.15 (MRV10/4) : couple en fonction du temps

Figure II.9 (MRV6/4), Figure II.16 (MRV10/4) : couple de sortie en fonction de la vitesse

Figure III.1.a Schéma de la MRV 6/4

Figure III.1.b La commande linéaire de la MRV (schéma des 3 phases)

Figure III.1.c Circuit de commutation (schéma par phase)

Figure III.1.d Logique de commande des interrupteurs (capteur de position)

Figure III.2.a : le couple pour « angle standard »

Figure III.2.b : la vitesse pour « angle standard »

Figure III.3.a : le couple pour « angle de conduction »

Figure III.3.b : la vitesse pour « angle de conduction »

Figure III.4.a : le couple pour « angle de distinction »

Figure III.4.b : la vitesse pour « angle de distinction »

 **Mots clés :**

MRV, FEM, ANSYS MAXWELL, Couple électromagnétique, MATLAB-SIMULINK, HYSTERESIS.

 **Symboles :**

DC : courant continu

AC : courant alternatif

Ce : couple électromagnétique

Rpm : Rotation par minute

$N_r$  : Nombre de pôles dans le rotor

$N_s$  : nombre de pôles dans le stator

$\omega$  : La pulsation.

$\Omega$  : La vitesse angulaire.

$j$  : la grandeur du vecteur densité de courant d'excitation.

$\mu$  : la perméabilité magnétique.

B : L'induction magnétique.

$\Gamma_r$  : L'interface entre le rotor et l'entrefer du moteur.

$L_n$  : La longueur du noyau magnétique du moteur.

$\theta_{on}$  : Angle de commutation (allumage).

$\theta_{off}$  : Angle de commutation (extinction).

W : L'énergie.

$V_s$  : La tension d'instantanée.

$\psi$  : Le flux magnétique.

J : Moment d'inertie.

## Introduction générale

Le concept de la machine à réluctance variable (MRV) est en réalité très ancien, en revenant aux inventions du 19ème siècle on l'appelait "moteurs électromagnétiques". Le moteur à réluctance variable est un moteur fondamentalement pas à pas et a eu beaucoup d'applications comme le moteur pas à pas rotatif et linéaire. L'idée d'utiliser la configuration MRV dans un mode continu (à la différence du mode pas à pas) avec commande par semi-conducteur de puissance a été introduite par Nasar, French, Koch et Lawrenson dans les années 1960 [1]. A cette époque, seulement les types semi-conducteurs thyristor de puissance étaient disponibles pour la commande des MRV. Ces dernières années, les transistors de puissance, GTO, IGBT, et MOSFET ont été développés dans les gammes de puissance exigées pour la commande de la MRV.

La configuration MRV élimine les aimants permanents, balai et collecteur. Le stator est constitué de feuilles d'acier formant des pôles saillants. Une série de bobines connectées indépendamment dans les paires de phase couvre les pôles du stator. Sans enroulement au rotor, le rotor est essentiellement un morceau d'acier (feuilleté) formant des pôles saillants. C'est le seul type du moteur à pôles saillants au rotor et au stator (double saillance), par conséquent, et aussi à cause de sa simplicité, la machine MRV promet une fiabilité et un prix bas de commande de vitesse, c'est la chose qui fait qu'elle va défié dans le future proche, toute autre machine existant dans l'industrie, comme les machine à cage et à courant continu.

Les MRV offrent de nombreuses avantages, tel que [1]:

- ✚ Les performances: grande capacité du couple avec un rendement légèrement plus élevé pour une gamme de vitesse plus large que le rendement du moteur à induction.

- ✚ Le petit dimensionnement : fait usage à des bonnes matières et à basse inertie.

- ✚ Le coût bas: le coût de fabrication et de matières est bas. Il n'utilise pas d'aimants.

- ✚ Haute vitesse et capacité de l'accélération : 100,000 tr/min, avec la bonne commande.

- ✚ Refroidissement : la plupart de la chaleur est produite dans le stator stationnaire qui est relativement facile à refroidir.

- ✚ La construction robuste : convenable pour un environnement agressif tel que la haute température et la vibration.

Dans le cas où les MRV sont commandées par un type de commande performante, Les applications de ces machines incluent:

- ✚ Les applications industrielles.

- ✚ Les applications spécifiques: compresseur, ventilateurs, pompes.

- ✚ Les applications domestiques: robots ménagers, machines à laver, aspirateur.

- ✚ Les applications de traction (véhicule électrique).

- ✚ Dans l'aviation.

Il existe trois approches concernant la modélisation des machines électriques [2] :

- Approche électrique ou équations du circuit électrique.

- Approche par réseaux de perméances.

- Approche par éléments finis.

Le but principal de ce mémoire est de modéliser la machine à réluctance variable et simuler son fonctionnement par le logiciel ANSYS MAXWELL afin d'obtenir les caractéristiques de la MRV. L'approche de modélisation utilisée dans ce cas est une

approche par élément finis. Le second but concerne l'étude comparative de la MRV 6/4 et 10/4 par les courbes obtenus dans ANSYS afin d'étudier les performances de ces deux moteurs pour choisir le meilleur moteur entre eux. Le troisième but concerne l'amélioration de l'alimentation de la MRV afin d'observer les ondulations du couple, vitesse, flux, courant en utilisant MATLAB/SIMULINK.

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

✚ Dans le Chapitre I : on donne le principe de fonctionnement du moteur MRV avec les différents avantages et inconvénients.

✚ Dans le Chapitre II : on va aborder la modélisation de la machine à réluctance variable en utilisant le logiciel ANSYS MAXWELL ainsi la comparaison entre les deux moteurs par les courbes obtenus dans logiciel.

✚ Dans le Chapitre III : on traite la simulation de la commande de la machine à reluctance variable 6/4 en utilisant MATLAB/SIMULINK.

Enfin nous terminerons par la conclusion générale et nos perspectives.

# CHAPITRE 1

## GENERALITES SUR LES MACHINES A RELUCTANCE VARIABLE

## I.1 Introduction

La machine à réluctance variable est une machine électrique dont le couple est produit par les forces d'attraction électromagnétiques exercées sur une partie mobile (rotor) qui se déplace vers une position où la réluctance est minimale.

Le principe des machines à réluctance variable a été établi il y a de cela un siècle. Elles ont été utilisées au début comme générateurs de hautes fréquences.

En fait celles-ci sont tombées dans l'oubli jusqu'en 1969 où elles ont réapparu en tant que moteurs, donnant lieu à de nouvelles interprétations théoriques. A l'heure actuelle et du fait de l'essor de la robotique et des progrès de l'électronique de puissance, les machines à réluctance variables sont en plein développement.

Les MRV ont trouvés un regain d'intérêt ces vingt dernières années, en association avec des alimentations électroniques de puissance, pour de petits appareillages. L'emploi des MRV est envisagé actuellement pour des entraînements lents à couple élevé.

## I.2 Historique

L'histoire des machines électromagnétiques débute véritablement à la fin de 1819 à Copenhague, par la mise en évidence de l'action à distance de la circulation d'un courant électrique sur une aiguille aimantée. Rappelons que l'Abbé NOLLET ainsi que FRANKLIN avaient remarqué qu'un courant électrique pouvait magnétiser ou démagnétiser les aimants environ 80 ans auparavant, ils n'avaient, cependant, pas eu la chance de voir une aiguille de boussole se mouvoir lorsqu'ils produisaient des décharges électriques. Malgré tout, les très nombreuses expériences réalisées un peu partout en Europe et en Amérique au XVIIIe siècle ont constitué les germes de la révolution de l'électricité du XIXe siècle. L'expérience, effectuée par le Danois Hans-Christian OERSTED allait susciter, lors de la publication de ses résultats en juillet 1820, une intense activité de recherche dans le monde entier. Ainsi, dès septembre 1820, le Français André-Marie AMPÈRE énonce la "règle du bonhomme d'Ampère", en novembre 1820, Dominique François ARAGO annonce qu'il a Réussi à aimanter un morceau de fer avec un solénoïde ; c'est aussi à cette époque qu'en Angleterre, Humphrey DAVY fait la même découverte : le principe de l'électroaimant était établi.

En 1821, l'Anglais Michael Faraday réalise le premier moteur électromagnétique. L'année suivante Peter Barlow lui adjoint une roue dentée. En 1831 Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. Dans la même période, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène. En 1832, Ampère, en collaboration avec le constructeur français Hippolyte Pixii, ont réalisé la génératrice à courant continu.

En 1836 l'Anglais Hyde Clarke réalisait une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Pixii/Ampère qui améliorait le commutateur redresseur.

En 1842 Davidson utilise un des premiers moteurs tournant à réactance variable (figure I.1) pour entraîner à 4 miles/heure (soit environ 6 km/h) un véhicule ferroviaire de 6 tonnes entre Edinburgh et Glasgow.

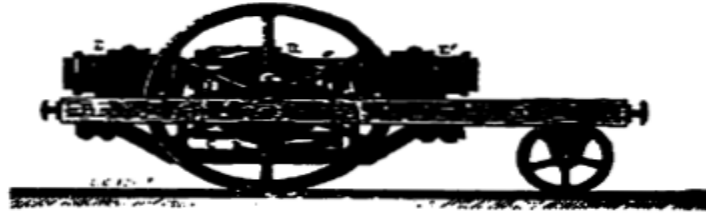


Figure I.1 Moteur de DAVIDSON (1840 environ)

En 1848 apparaissaient les moteurs de Froment dont le couple atteignait 500 N.m. Ces moteurs furent probablement les premiers à être utilisés pour les applications industrielles (figure I.2). En 1860 la compagnie « l'Alliance » fabriquait industriellement des génératrices de structures complexes.

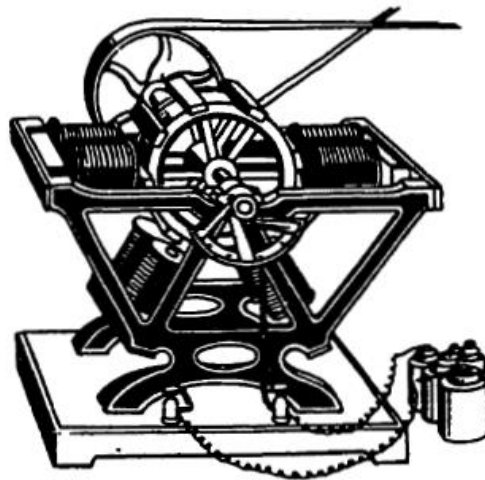


Figure I.2 Moteur élémentaire de Froment (1845)

En 1865 l'Italien Antonio Pacinotti construit un prototype de machine à courant continu à induit en anneau et collecteur radial dont le fonctionnement est très amélioré.

En 1888 Nikola Tesla déposa une quantité de brevets pour tout son système polyphasé (transformateurs, générateurs, moteur synchrones et asynchrones, etc.). Dans ces années, une lutte entre Edison et Tesla est apparue au sujet du choix du courant continu ou alternatif pour la production et l'utilisation de l'énergie électrique.

### I.3 Constitution d'Une Machine à Reluctance Variable

Les machines à réluctance variable que nous étudions sont dotées d'une double denture (figure I.3), avec  $N_r$  dents sur le rotor et  $N_s$  dents sur le stator, qui est bobiné. Une caractéristique notable de ces machines est l'absence de circuit d'excitation. Les deux pièces polaires sont fabriquées à partir d'un empilage de tôles en matériau ferromagnétique.

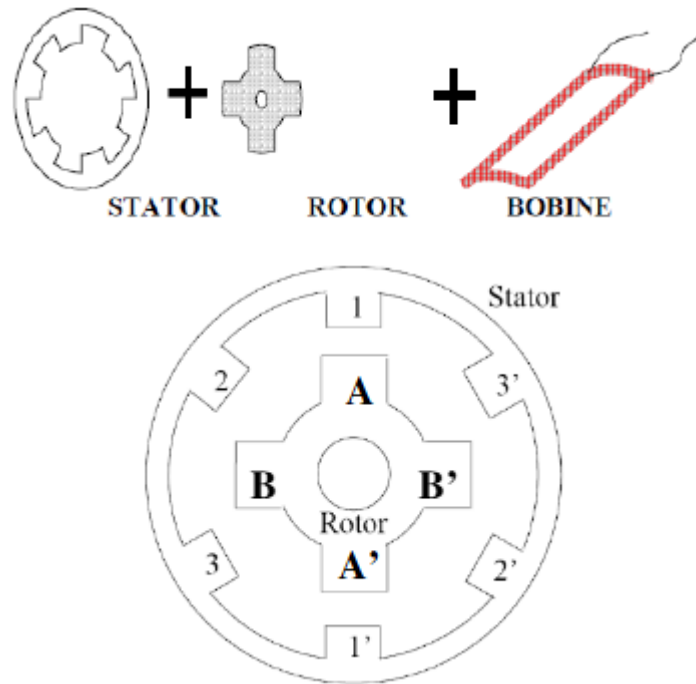


Figure I.3 Constitution d'une MRV [15].

## I.4 Principe de fonctionnement

### I.4.1 Structure de base d'une MRV

Le principe de fonctionnement d'une machine à réductance variable peut être décrit à partir d'une structure monophasée élémentaire identique à celle présentée ci-dessous figure (I.4).

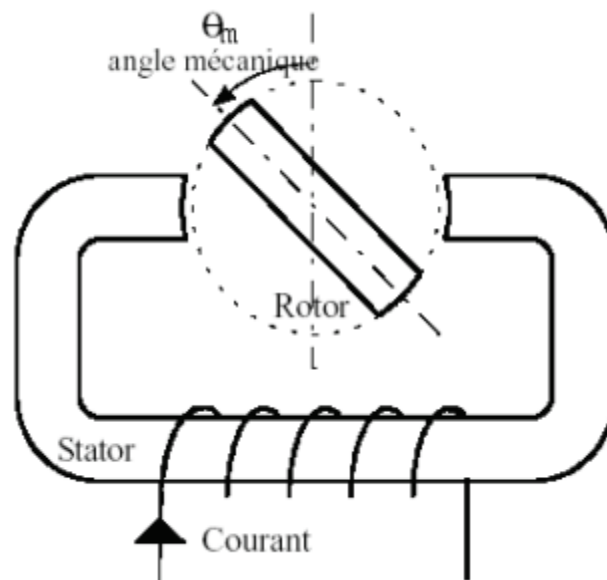


Figure I.4 Machine à réductance variable ; structure élémentaire

Le mouvement de la machine est obtenu par la tendance du rotor à s'aligner avec l'axe magnétique de la phase statorique.

Cette structure possède deux positions rotoriques :

- Une position d'opposition pour laquelle le circuit magnétique présente une réductance maximale ou inductance minimale, figure (I.5.a)
- Une position de conjonction où la réductance est minimale donc inductance maximale, figure (I.5.b).

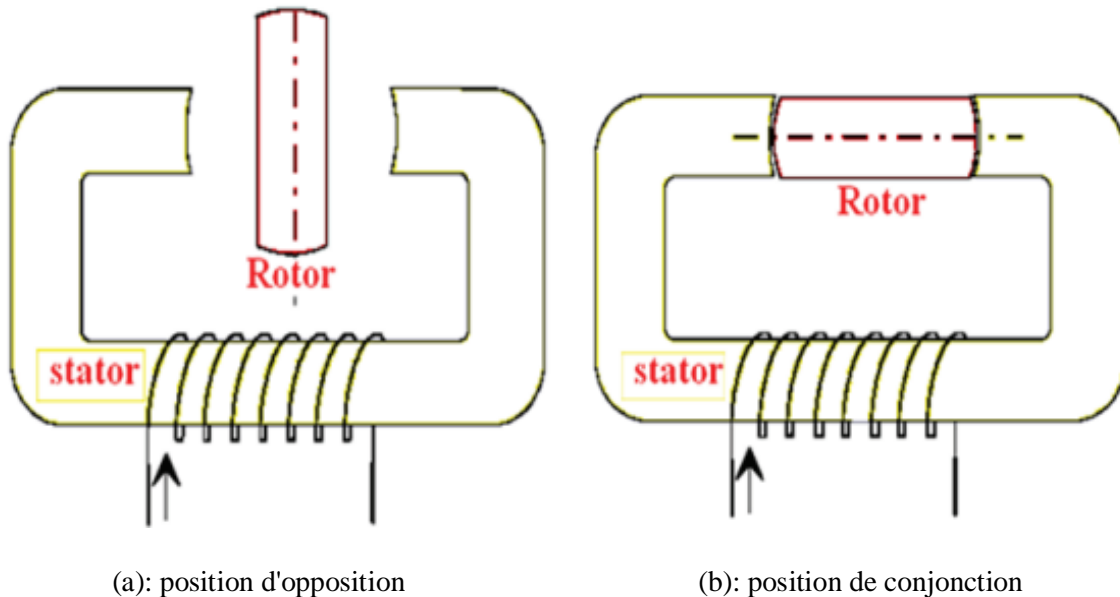


Figure I.5 Les différentes Positions du rotor relatives aux deux réductances extrêmes.

Si le rotor se situe dans une position entre l'opposition et la conjonction et que l'on envoie un courant dans l'armature fixe, cela change l'état du système. Celui-ci cherche alors à avoir une réductance minimale, ce qui signifie que le flux maximal peut passer entre les armatures. Quand le courant est enlevé, si l'énergie cinétique accumulée lors de la rotation est assez grande pour pousser le rotor jusqu'à l'opposition, il sera alors possible de répéter le cycle et de créer un mouvement de rotation continu.

## I.5 Modes d'alimentations

Théoriquement, il existe 2 modes fondamentaux d'alimentation en moteur [3]:

### I.5.a Alimentation en courant unidirectionnel

Type haché synchronisé (Figure I.6) avec le mouvement du rotor (capteur de position). Ce courant en créneaux est : superposition du courant DC (excitation série) + AC ( $\omega = N_r \cdot \Omega$ ).

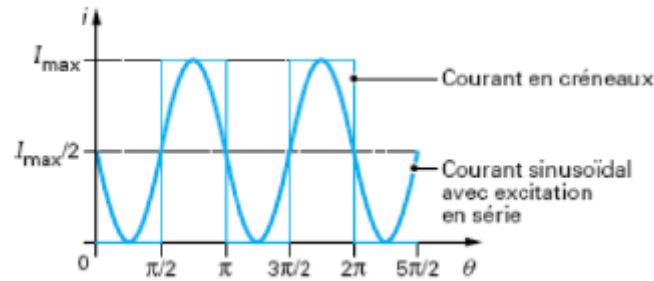


Figure I.6 Alimentation en courant unidirectionnel.

### **I.5.b Alimentation en courant alternatif**

En remarquant que le sens du courant n'intervient pas dans le fonctionnement précédent (sens de rotation et signe du couple ne dépendent que des valeurs de  $\theta$  pour lesquelles le bobinage est alimenté ou non), on devrait obtenir un fonctionnement identique au précédent avec une alimentation purement alternative de pulsation  $w' = (Nr/2) \cdot \Omega$ .

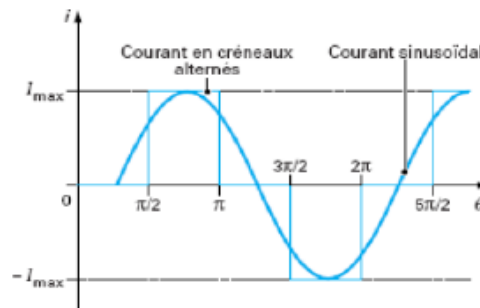


Figure I.7 Alimentation en courant bidirectionnel.

## **I.6 Avantages, Inconvénients de la MRV**

La machine à réductance variable (MRV) est un moteur électrique sans aimants permanents ni enroulements sur le rotor. Elle utilise la variation de réductance magnétique pour générer un couple moteur. Ci-dessous sont présentés les principaux avantages et inconvénients de cette technologie, accompagnés de sources fiables [4], [15].

### ➤ **Avantage:**

- Structure simple et robuste.
- Le rotor de la machine est dépourvu d'enroulements, ce qui la rend intrinsèquement moins coûteuse.
- Rapport couple/inertie élevé. Elle offre un couple de démarrage élevé sans courant d'appel et sa densité de puissance est comparable à celle d'une machine à induction.
- La vitesse de fonctionnement maximale et les températures maximales du rotor qu'elle peut supporter sont supérieures à celles d'autres machines de puissance similaire.
- Rendement élevé : atteignant jusqu'à 95 %, avec une faible génération de chaleur.

- Durabilité et fiabilité : peu de maintenance, longue durée de vie.
  - **Inconvénient:**
- Ondulations de couple et bruit acoustique : générés par la variation de réductance.
- Complexité du contrôle : nécessite une électronique avancée.
- Sensibilité à la précision de fabrication : surtout au niveau de l'entrefer.
- Rendement variable selon les conditions de fonctionnement.

## I.7 Domaine d'application du moteur à réductance variable

Malgré les inconvénients que présente la Machine à RV, ses qualités ont conduit à son développement et son utilisation dans plusieurs application industrielles, telles que :

- L'électroménager.
- Industrie automobile (moteur d'accessoires automobiles).
- Fabrication des machines à outils.
- Traction électrique, industries des véhicules hybrides.
- Climatisation de l'air cycle dans un train, avec une puissance de 40 kW et une vitesse nominales de 3,0 104tr/min [5].
- Transport de charbon dans la mine de Selby au Royaume-Uni. La vitesse de la machine varie de 0 à 2000 tr/min et la puissance nominale est de 300 kW [5].

## I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné la constitution de la machine à réductance variable. Ensuite, nous avons illustré son principe de fonctionnement et enfin une étude détaillée de son alimentation. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et la simulation de la machine à réductance variable.

## CHAPITRE 2

### Modélisation de la machine à reluctance variable

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous consacrer à l'étude approfondie de la simulation et de la modélisation de deux types de moteurs à réluctance variable, à savoir les configurations 6/4 et 10/4. Cette démarche a pour objectif principal d'effectuer une comparaison détaillée entre ces deux structures, en s'appuyant sur les résultats obtenus à travers le logiciel de simulation ANSYS MAXWELL (Voir Annexe A). Les paramètres analysés incluront principalement le couple électromagnétique, la puissance développée, la vitesse de rotation, ainsi que d'autres grandeurs caractéristiques permettant d'évaluer les performances globales de chaque moteur. À travers cette analyse comparative, nous chercherons à identifier la configuration la plus performante et la mieux adaptée à l'application visée, en tenant compte à la fois des aspects techniques et du comportement dynamique de chaque modèle.

## II.2 Equations du champ magnétique

La simulation peut valablement être faite au moyen des équations de maxwell dans l'approximation des états statiques. La description de ces équations sous la forme d'une équation scalaire en terme de la grandeur du potentiel vecteur A dans un repère cartésien est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + j = 0 \quad \text{II.1}$$

j : la grandeur du vecteur densité de courant d'excitation.

$\mu$  : la perméabilité magnétique.

Pour résoudre cette équation appliquée au moteur, nous tiendrons compte des conditions de continuité de champ magnétique le long des interfaces et d'une condition aux limites de Dirichlet ( $A=0$ ), imposée sur le contour extérieur de l'air.

## II.3 Méthode des éléments finis

Appliquée à la conception des structures électromagnétiques, la méthode des éléments finis est devenue un outil très répandu, elle consiste à chercher une solution approchée à partir d'une discrétisation du domaine d'étude sur lequel les équations de maxwell sont résolues. Cette méthode permet de déterminer un champ scalaire ou vectoriel ou même tensoriel satisfaisant à un ensemble d'équations aux dérivées partielles et d'équations ordinaires en tout point du domaine d'étude et à tout instant, tout en respectant les conditions aux limites. Si le temps n'apparaît pas comme variable dans la formulation, ce dernier est dit stationnaire, sinon c'est un problème d'évolution [6].

Le secteur dans lequel la simulation se déroule est divisé en parties. Ces parties permettent de créer des solutions approximatives, où les variables indéterminées représentent les valeurs de la solution à un groupe de points précis qui correspondent aux nœuds de la discrétisation. Pour chaque point, un potentiel est calculé, comme illustré dans la figure (II.1).

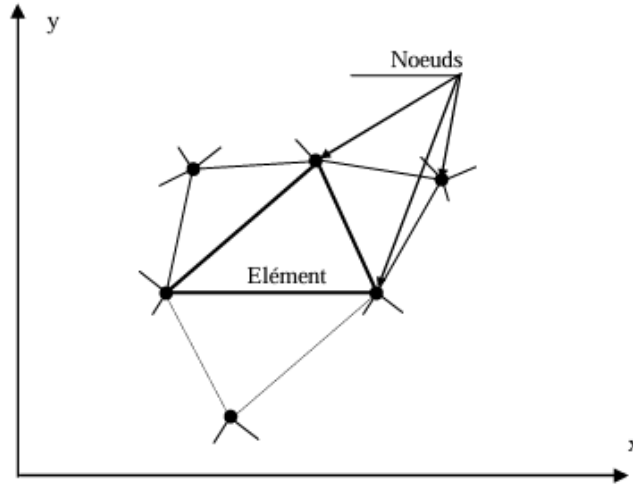


Figure II.1 Discretisation par éléments finis en deux dimensions.

Considérons un domaine homogène  $\Omega$  maillé en  $M'$  éléments finis et  $M$  éléments de frontière, la formulation intégrale discrétisée en éléments finis s'écrit:

$$\sum_{e=1}^{M'} \iint_{\Omega_e} \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial N}{\partial X} \frac{\partial A}{\partial X} + \frac{\partial N}{\partial Y} \frac{\partial A}{\partial Y} \right) d\Omega_e = \sum_{e=1}^M \int_{\Gamma_e} \frac{1}{\mu} \times N \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma_e + \sum_{e'=1}^{M'} \iint_{E_{e'}} N j d\Omega_{e'} \quad \text{II.2}$$

Les approximations nodales du potentiel vecteur et de sa dérivée normale sont des fonctions de coordonnées de référence  $\xi$  et  $\eta$ :

$$A = \sum_{j=1}^{N_n} N_j(\xi, \eta) \times A_{ij} \quad \text{II.3}$$

$$\frac{\partial A}{\partial n} = \sum_{j=1}^3 N_j * (\xi) \cdot \left( \frac{\partial A}{\partial n} \right)_{ij} \quad \text{II.4}$$

$N_j$ : est le nombre de nœuds d'interpolation sur l'élément fini  $\Omega_e$  considéré, il vaut 4 pour un triangle quadratique curviligne et 6 pour un quadrilatère quadratique curviligne.  $N$  sont les fonctions de forme de ces éléments finis.

## II.4 Calcul des paramètres électromagnétiques

La valeur de flux d'induction magnétique qui traverse un circuit fermé  $\Lambda$  est donné par :

$$\phi = \int_{\Lambda} A \cdot dl \quad \text{II.5}$$

L'inductance d'un enroulement de phase d'un moteur à réductance variable peut donc être calculée à partir de la valeur du flux d'induction qui traverse cette phase. Le couple électromagnétique « Ce » à l'arbre du moteur est calculé à partir de l'expression suivante:

$$C_e = \frac{1}{\mu_0} L_n \int_{\Gamma_r} \left[ (r \times B)(B \cdot n) - \frac{1}{2} B^2 (r \times n) \right] \quad \text{II.6}$$

Où

$$\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A}) \quad \text{II.7}$$

$B$  : L'induction magnétique.

$\Gamma_r$  : L'interface entre le rotor et l'entrefer du moteur.

$L_n$  : La longueur du noyau magnétique du moteur.

## II.5 Résultats numériques

Le calcul se fait à l'aide du logiciel ANSYS MAXWELL (voir annexe B,D), qui est basé sur la résolution des équations de Maxwell par la méthode des éléments finis et qui a été appliquée au calcul de champ magnétique dans deux moteurs à réluctance variable, le premier moteur comporte 6 pôles au stator, 4 pôles au rotor, le deuxième moteur comporte 10 pôles au stator, 4 pôles au rotor comme définis sur les figures II.2.a, II.2.b.

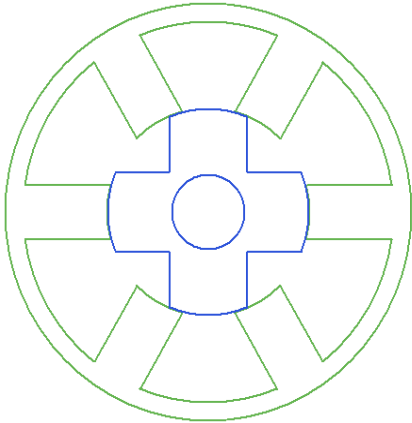


Figure II.2.a: MRV 6/4

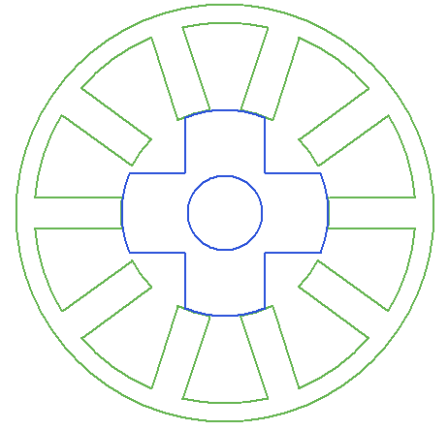


Figure II.2.b: MRV 10/4

### II.5.1 Etude et la simulation de la machine à réluctance variable 6/4

Après avoir configuré les paramètres du moteur dans le logiciel ANSYS Maxwell et procédé à son passage en environnement 2D [10], nous avons pu extraire un ensemble de données caractéristiques liées à son fonctionnement. Ces résultats obtenus constituent une base solide pour une analyse critique et un commentaire approfondi, permettant de mieux comprendre le comportement électromagnétique du moteur simulé[8].

#### II.5.1.a Le courant

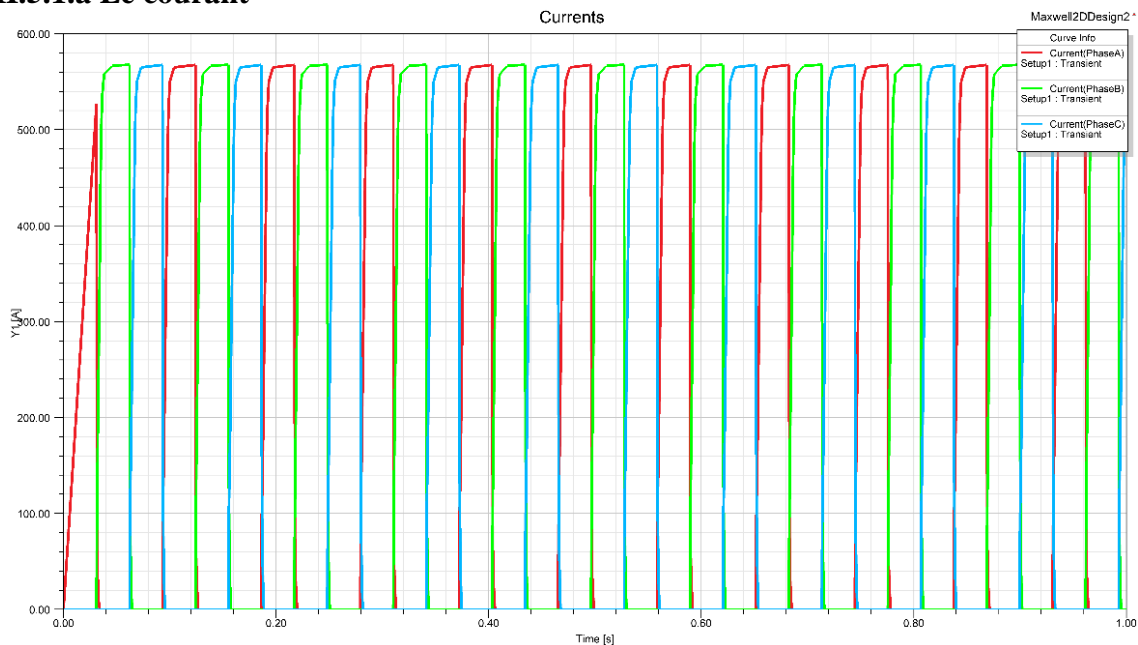


Figure II.3 : Les courants en fonction de temps

La figure II.3 représente les courants des trois phases (A, B et C) en fonction du temps pour la machine 6/4. Lorsque les interrupteurs (figure I.6 : schéma alimentation) sont fermés, le courant du stator augmente jusqu'à atteindre la valeur souhaitée pour une tension appliquée +VE, et lorsque les interrupteurs sont ouverts pour une tension de -VE appliqué, le courant diminue jusqu'à zéro, où la valeur maximale est de 570 A.

### II.5.1.b Le flux

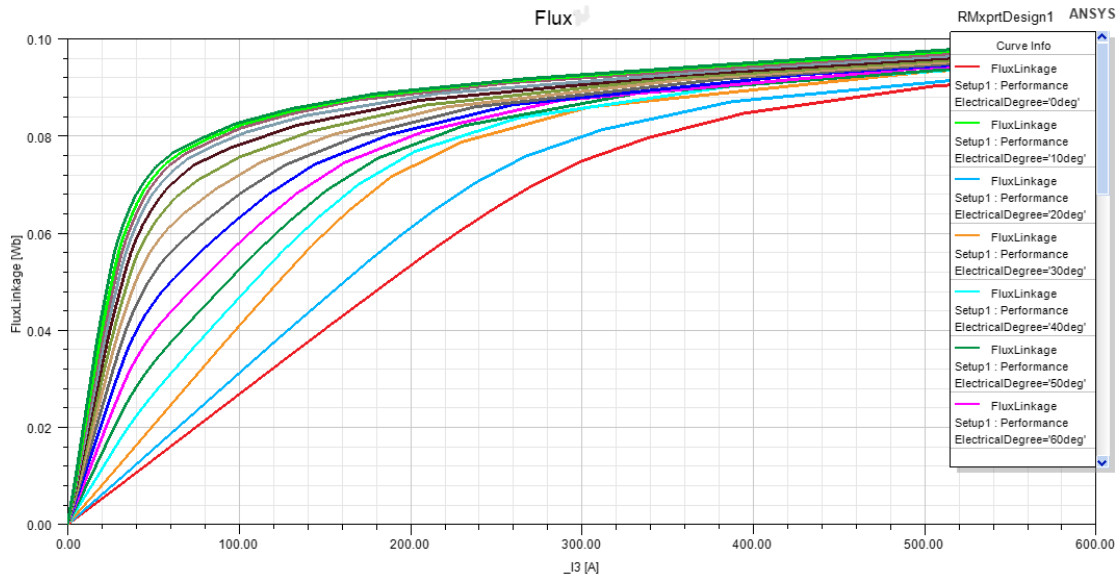


Figure II.4 : flux en fonction de courant

La figure II.4 montre le flux magnétique pour différentes positions du rotor et de l'amplitude du courant de phase. Nous obtenons alors le réseau de courbes révélant les effets de la saturation. La plus basse courbe correspond à la position non alignée et la courbe du sommet correspond à la position alignée.

### II.5.1.c Le rendement

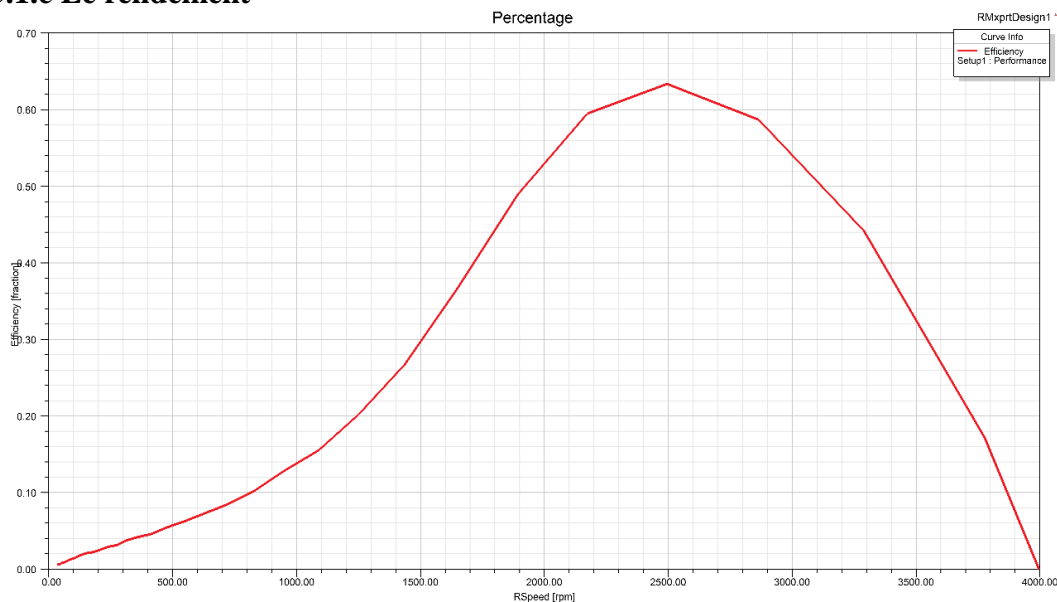


Figure II.5 : le rendement en fonction de la vitesse

La figure II.5 décrit le rendement de la machine en fonction de la vitesse, Nous constatons une augmentation du rendement du moteur à 64 % à une vitesse de 2500 rpm, c'est un faible rendement due à Certains matériaux ont eu des pertes plus importantes que d'autres, ce qui explique la différence de rendement du moteur.

#### II.5.1.d La puissance

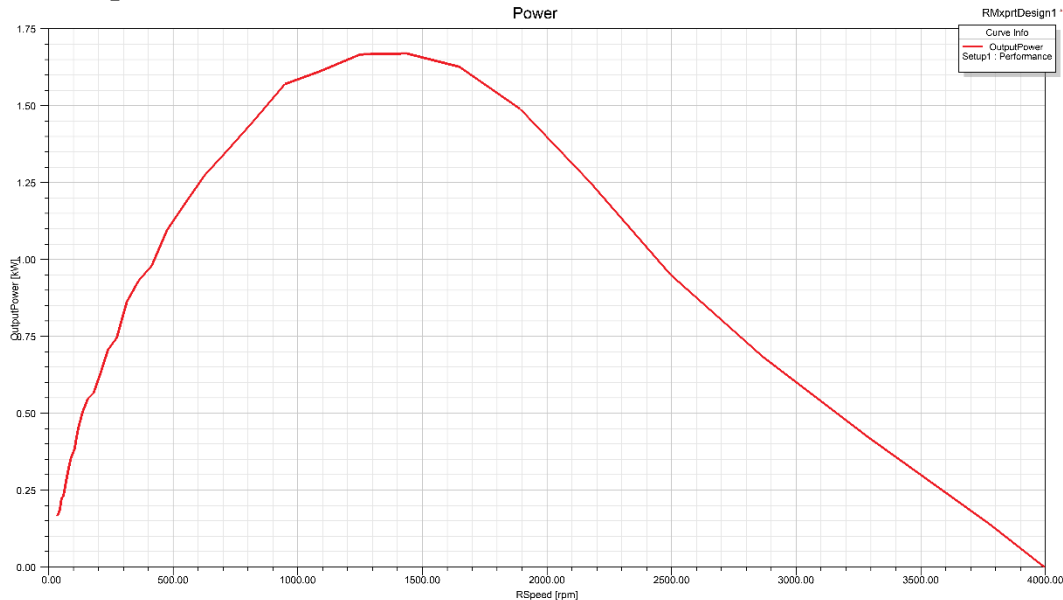
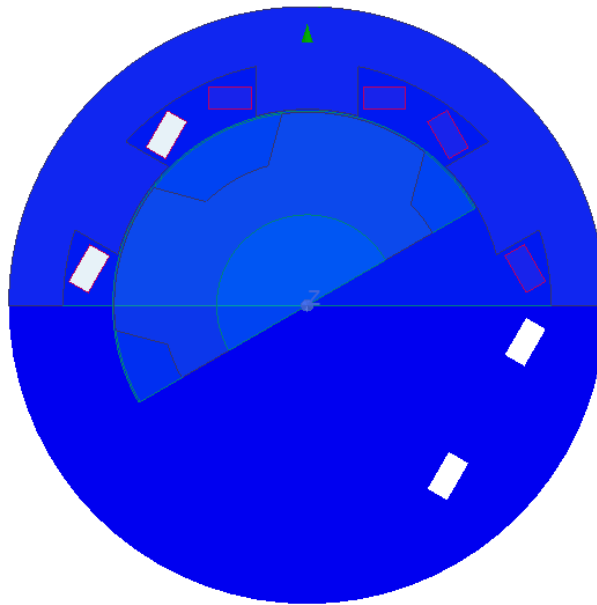


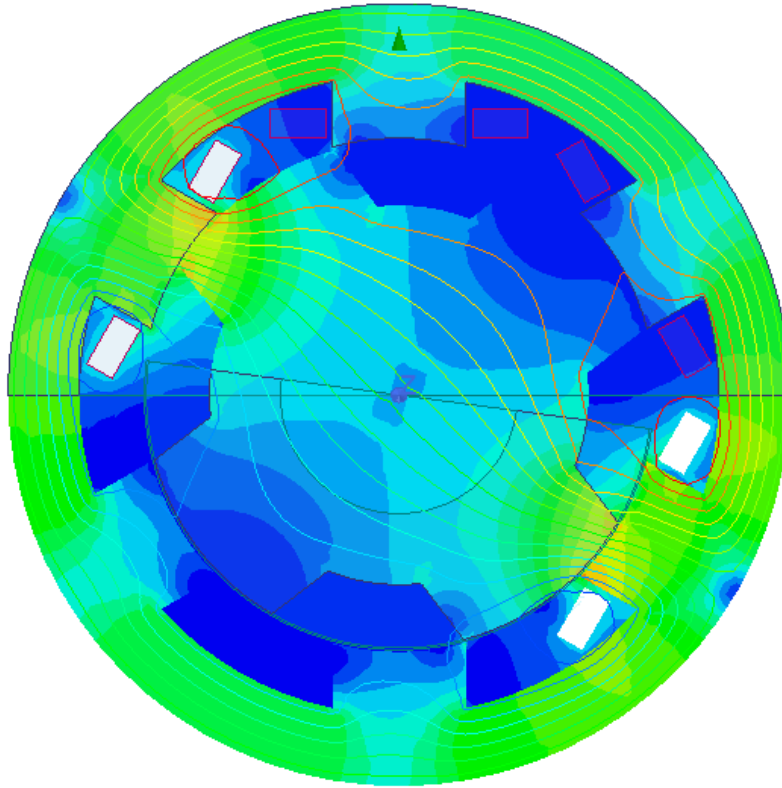
Figure II.6: la puissance de sortie en fonction de la vitesse

La relation entre la puissance de sortie du MRV et sa vitesse est représentée dans la Figure.II.4, où la puissance de sortie maximale est de 1,67 KW à 1450 tr/ min, et elle diminue progressivement par la suite.

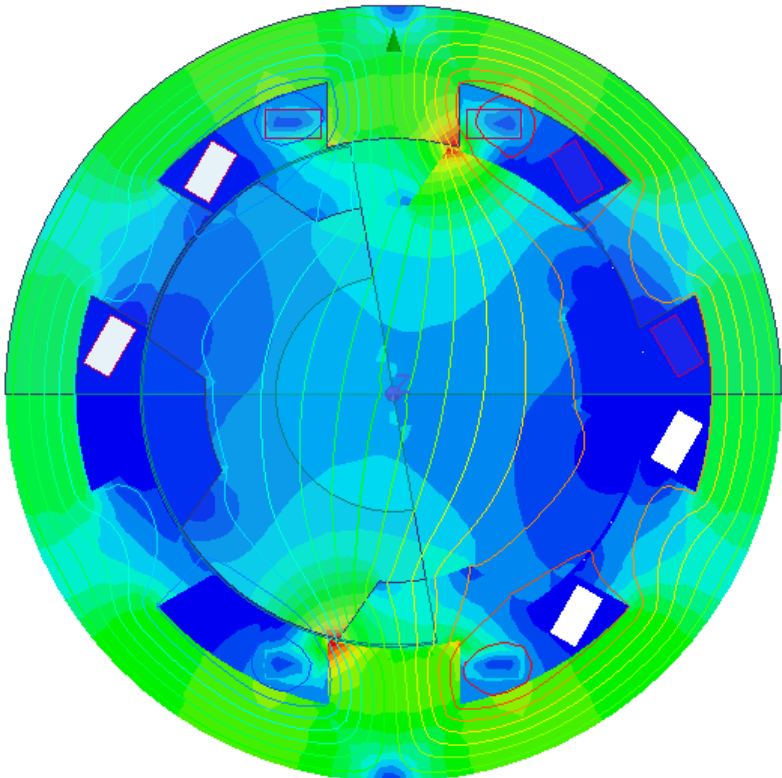
#### II.5.1.e Le flux avec la position rotor



II.7.a La position du rotor à t=0s



II.7.b La position du rotor à t=0.5s



II.7.c La position du rotor à t=1s

Figure II.7: la densité du flux en fonction de position rotor

La figure II.7 montre la distribution du flux magnétique en fonction de la position du rotor pour une phase, de la position non alignée à la position alignée; la légende de la figure montre clairement les valeurs du flux pour différentes régions de la machine.

### II.5.1.f Le couple

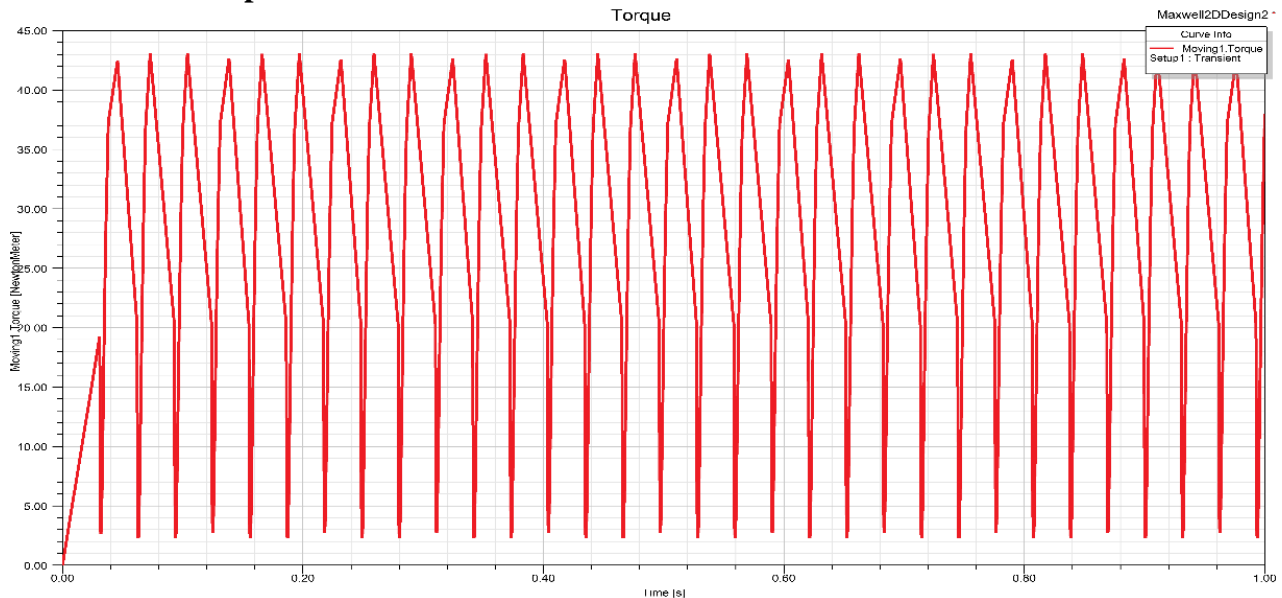


Figure II.8 : couple en fonction du temps

La figure II.8 montre la variation du couple, qui change de manière constante et régulière à mesure qu'il augmente jusqu'à atteindre la valeur de couple maximale et diminue légèrement avec une faible ondulation, et le couple nominal est de 21.0467 Nm.

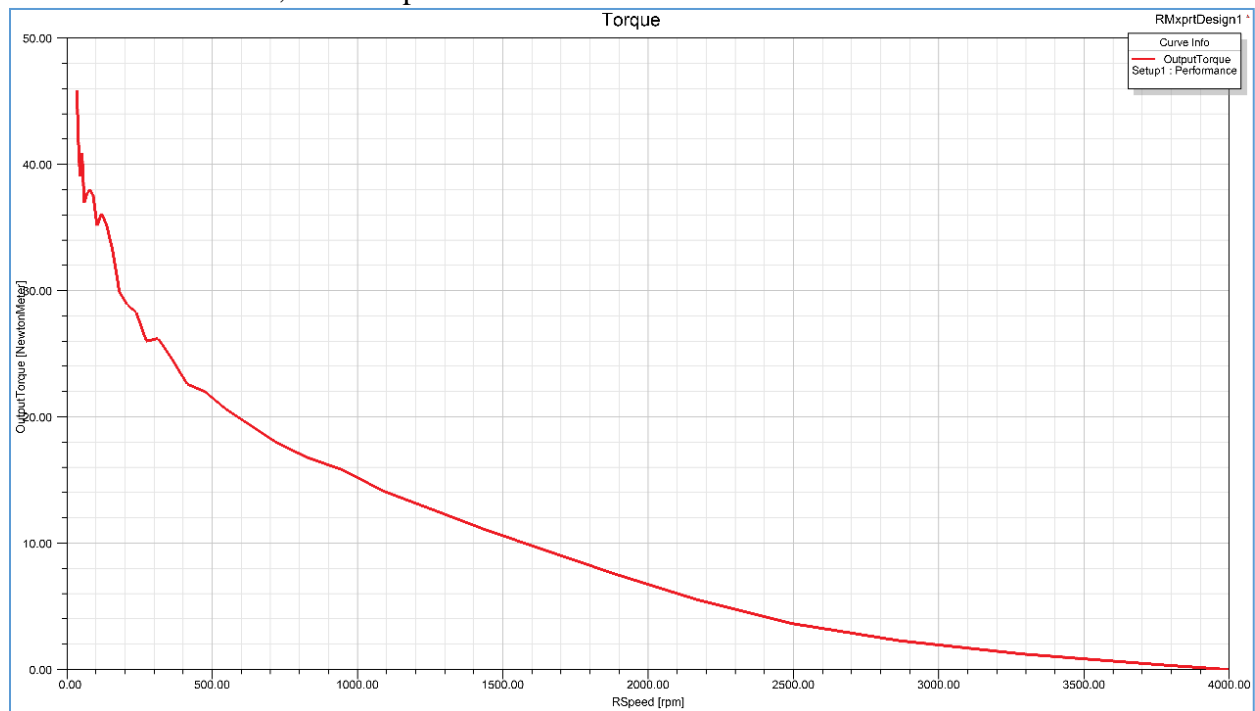


Figure II.9 : couple de sortie en fonction de la vitesse

La relation entre le couple et la vitesse est illustrée sur la figure II.9, elle commence à 45.9215 N.m et diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse.

## II.5.2 Etude et la simulation de la machine à reluctance variable 10/4

### II.5.2.a Le courant

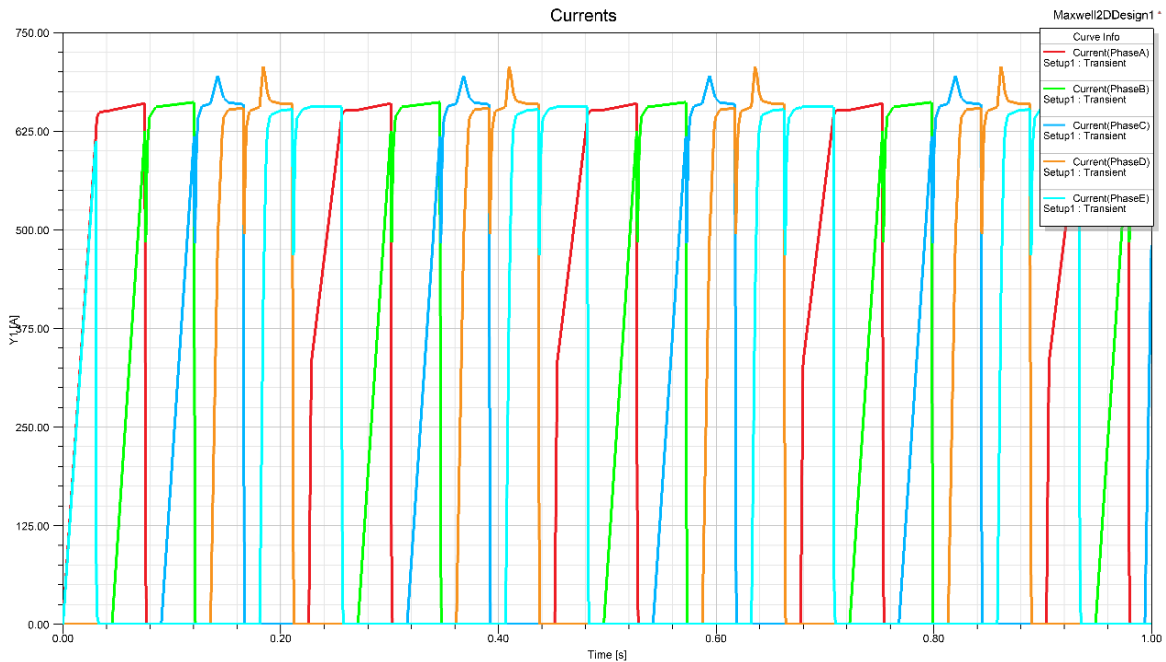


Figure II.10 : les courants en fonction du temps

La figure II.10 représente les courants des cinq phases (A, B, C, D et E) en fonction du temps pour la machine 10/4. Lorsque les interrupteurs (figure I.6 : schéma alimentation) sont fermés, le courant du stator augmente jusqu'à atteindre la valeur souhaitée pour une tension appliquée +VE, et lorsque les interrupteurs sont ouverts pour une tension de -VE appliqué, le courant diminue jusqu'à zéro, où la valeur maximale est de 720 A.

### II.5.2.b Le flux

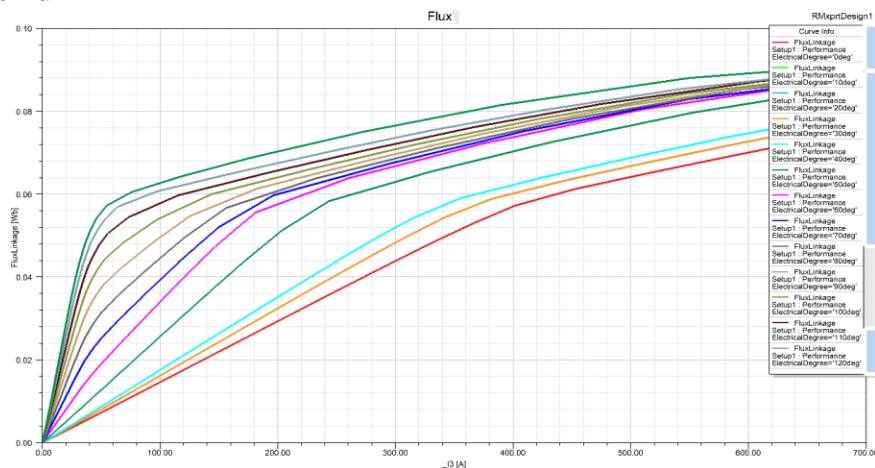


Figure II.11: le flux en fonction de courant

Le flux magnétique pour différentes positions du rotor et de l'amplitude du courant de phase (figure II.11), dont la valeur maximale est de 0,92 avec courant maximal de 65,18 A. dont l'angle de rotation commence de 0° jusqu'à 180 °.

### II.5.2.c Le rendement

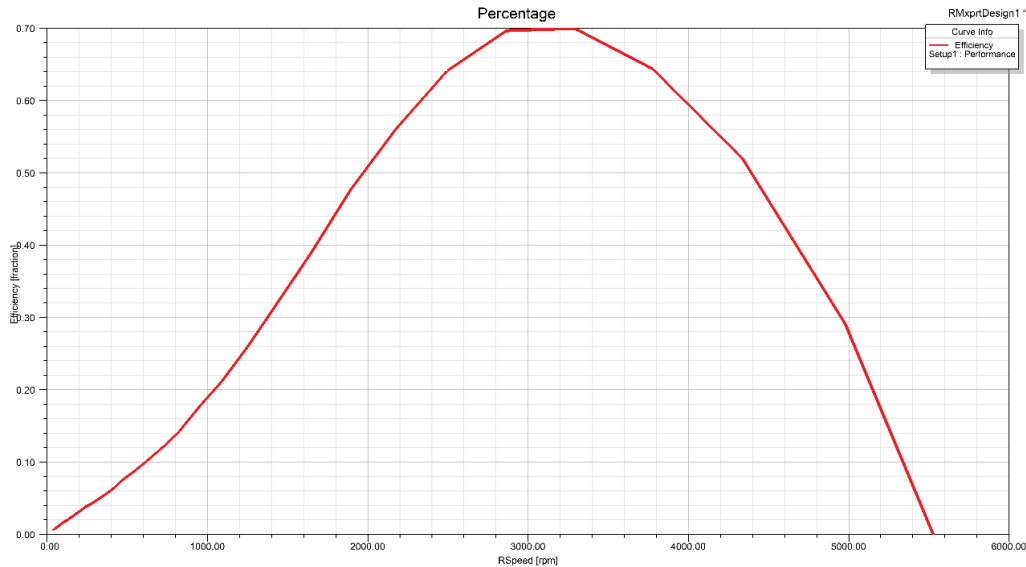


Figure II.12: le rendement en fonction de la vitesse

Nous constatons une augmentation du rendement du moteur à 70 % à une vitesse de 3000 tr/mn, c'est un bon rendement due à la caractéristique de la MRV 10/4 ce qui explique la différence de rendement du moteur.

### II.5.2.d La puissance

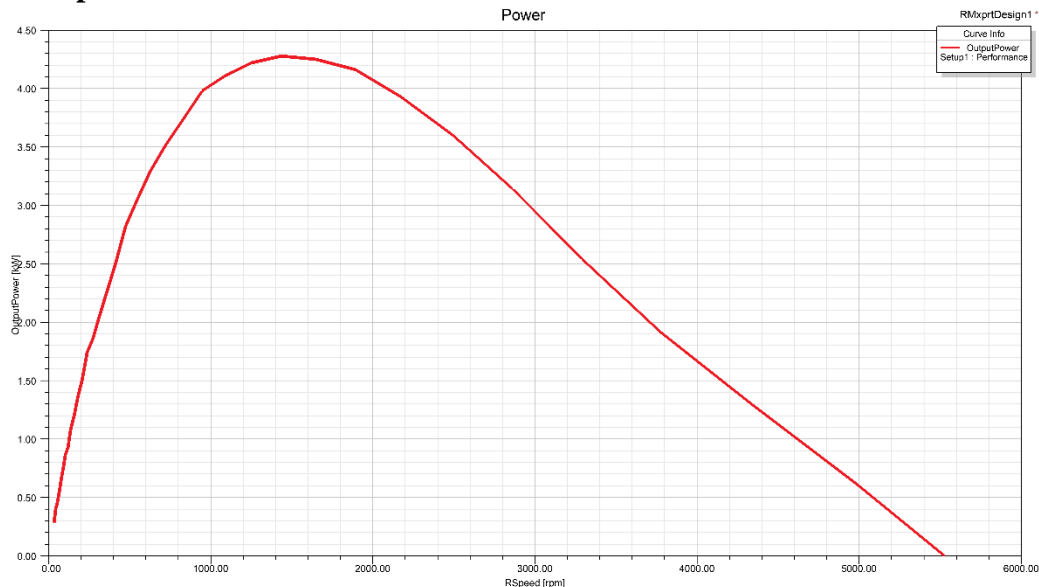
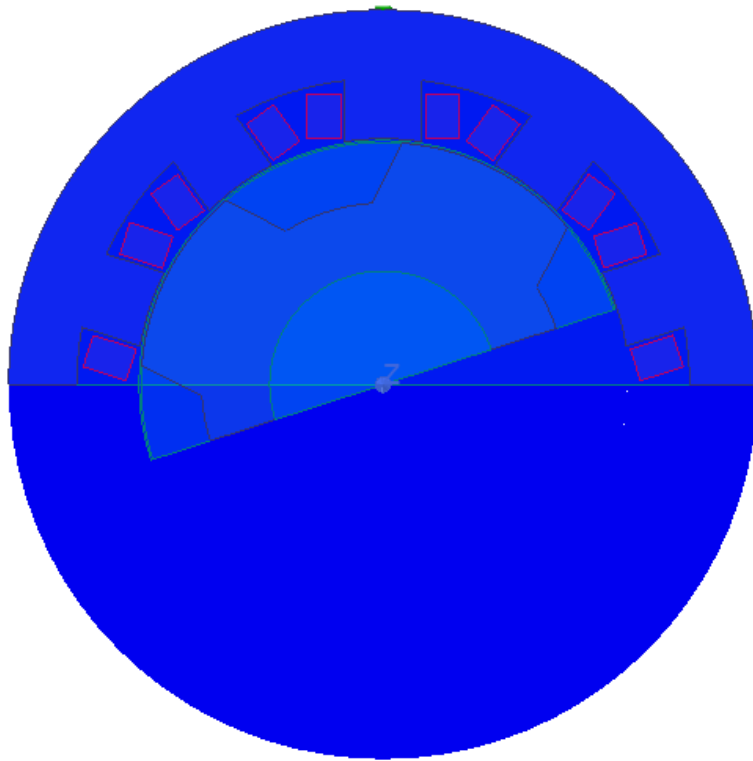


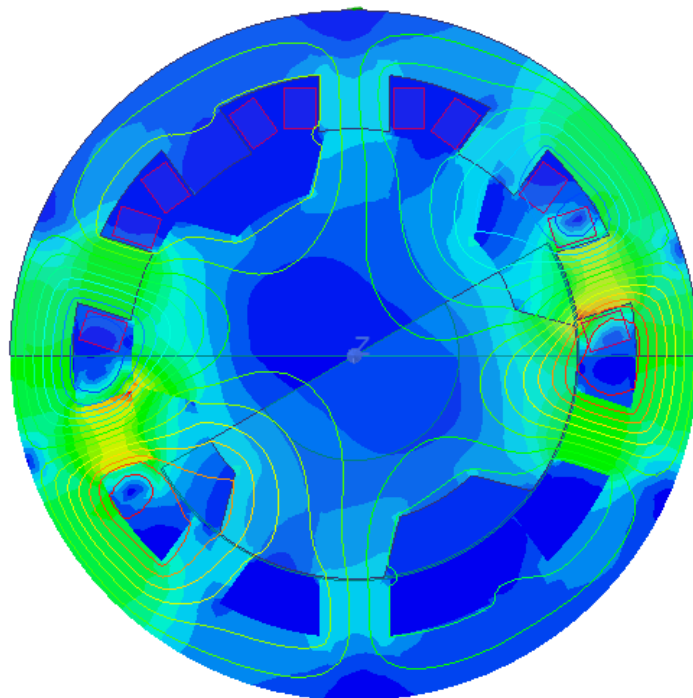
Figure II.13: La puissance en fonction de la vitesse

La relation entre la puissance de sortie du MRV et sa vitesse est représentée dans la Figure II.13, où la puissance de sortie maximale est de 4,3 kW à 1450 tr/min, et elle diminue progressivement par la suite.

II.5.2.e Le flux avec la position rotor



II.14.a La position du rotor à t=0s



II.14.c La position du rotor à t=0.5s

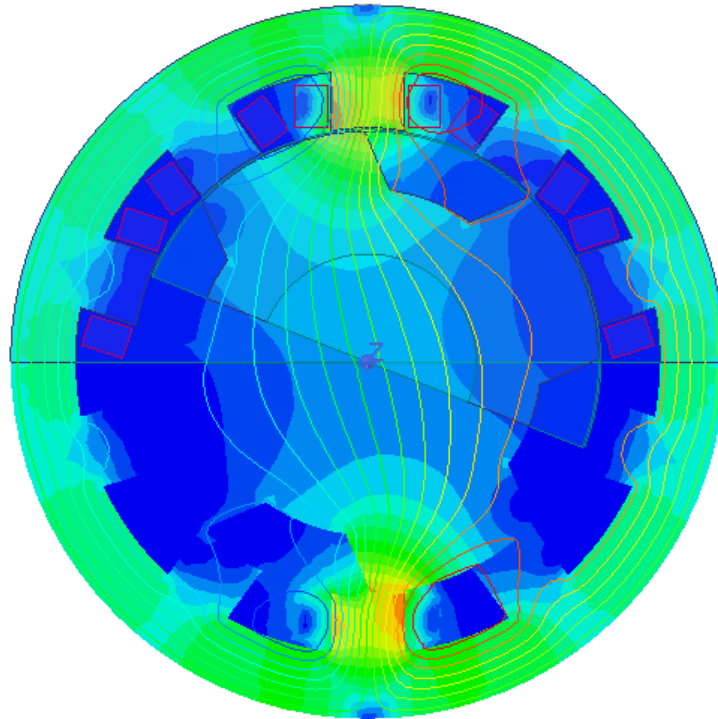
II.14.c La position du rotor à  $t=1s$ 

Figure II.14: le flux en fonction de la position de rotor

La relation entre le flux magnétique et la position du rotor est montrée sur la figure II.14, de la position du rotor non alignée à la position alignée pour une phase, qui montre comment le flux change pour les positions différentes de rotor.

### II.5.2.f Le couple

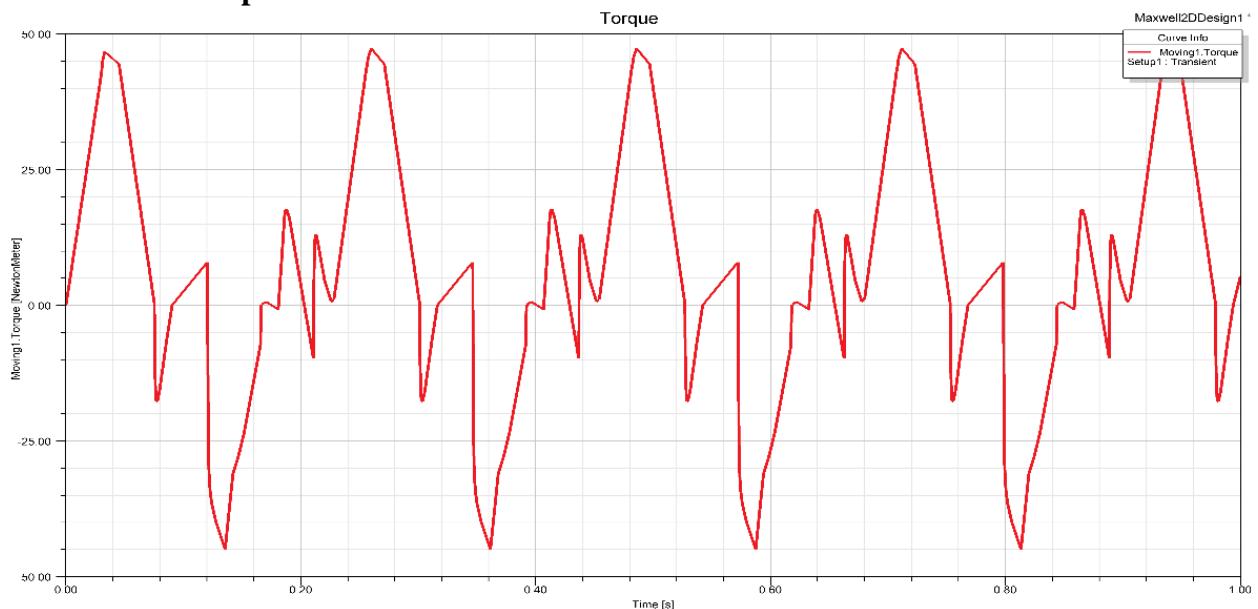


Figure II.15: le couple en fonction du temps

La figure II.15 montre la variation du couple, qui change de manière constante et régulière à mesure qu'il augmente jusqu'à atteindre la valeur de couple maximale et diminue légèrement avec une grande ondulation avec le couple nominal est de 18.215 Nm.

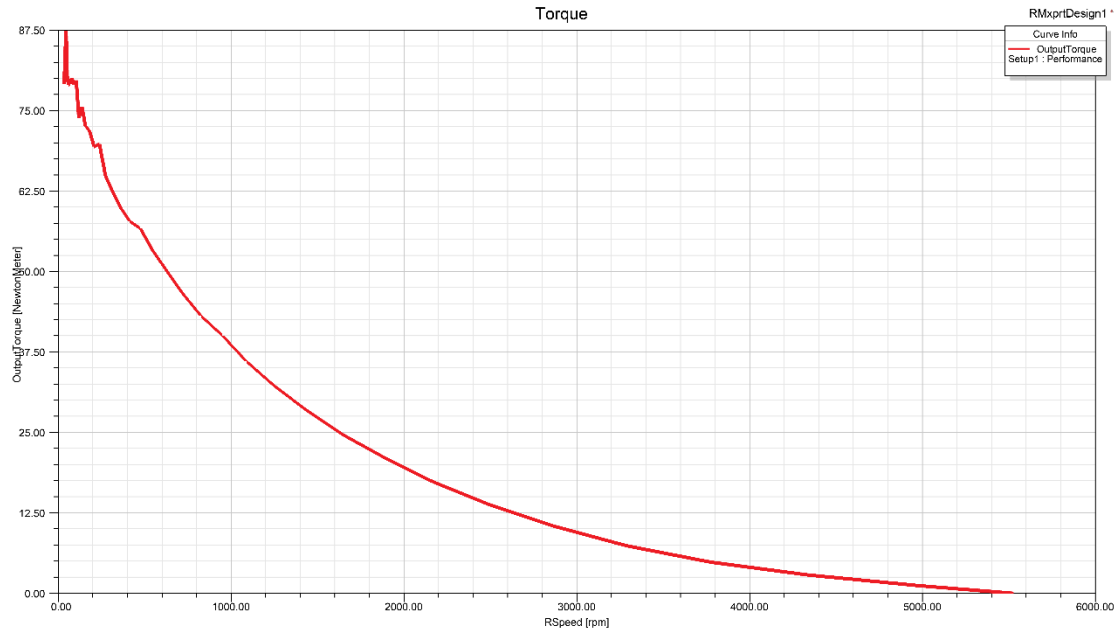


Figure II.16: le couple en fonction de la vitesse

La relation entre le couple et la vitesse est illustrée sur la figure II.16, car elle commence à 87.50 N.m et diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse.

## II.6 La comparaison entre les deux Moteurs à reluctance variable

### II.6.a Par le courant: (voir figure II.3 et II.10)

Les valeurs de courant maximales dans le MRV 10/4 atteignent environ 720 A. Alors que dans le MRV 6/4, elles atteignent environ 570 A. Le courant maximal dans le MRV 10/4 semble être environ 25 % supérieur à celui du MRV 6/4 ce qui reflète la capacité à produire un couple plus important et une plus grande capacité de puissance électrique dans les phases [11]. Cela signifie que le MRV 10/4 fonctionne à des vitesses plus faibles, mais fournit un courant plus stable avec des pics distincts et peu de chevauchement avec les autres phases, ce qui indique une meilleure distribution du courant. La réduction du nombre de pôles dans le MRV 6/4 entraîne des interférences entre les phases, ce qui diminue l'efficacité de la conversion électromagnétique et rend le contrôle des courants et de la distribution de puissance entre les phases difficile et plus compliqué.

### II.6.b Par le couple (voir figure II.8 et II.15)

Après avoir augmenté le nombre de pôles statoriques des MRVs, on observe une augmentation de couple maximal, passant de 43 Nm à 47 Nm, ce qui indique que le MRV 10/4 a un comportement dynamique amélioré, une puissance accrue et une réponse améliorée aux charges plus lourdes, ce qui le rend adapté aux applications qui nécessitent un couple élevé et une puissance plus importante. Ce qui résulte de l'augmentation du nombre de pôles du stator, ce qui entraîne des interactions magnétiques plus complexes et affecte la stabilité des performances [12]. Notez que dans ce cas, l'augmentation des pôles du stator a été prise en compte uniquement sans ajuster les autres facteurs, mais la fluctuation et l'ondulation du couple du MRV 10/4 peuvent être réduites en améliorant les différents aspects.

**II.6.b Par le rendement** (voir figure II.5 et II.12)

Les résultats indiquent que le MRV 10/4 atteint progressivement des valeurs de rendement plus élevées initialement à des vitesses inférieures à 3000 rpm par rapport au MRV 6/4. À des vitesses supérieures à 2500 rpm, mais de faible variation, la courbe de rendement du MRV 10/4 diminue progressivement par rapport au MRV 6/4[13].

Cette diminution est due à l'augmentation des pertes dynamiques et aux pertes dues aux courants de Foucault et aux interférences électromagnétiques qui sont affectées par la conception et le nombre de pôles du stator.

**II.7 Conclusion**

Ce travail présente une étude comparative des conceptions de MRV 10/4 et 6/4 présentant une conception efficace basée sur des dimensions et des conditions de fonctionnement similaires. Seuls les pôles du stator ont été modifiés pour étudier son impact sur le rendement, les performances et les pertes. Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de pôles dans le stator modifie le comportement du courant et sa distribution entre les phases et permet une augmentation des maximum valeurs de courant, ce qui améliore les performances dynamiques et la stabilisation du couple. La réduction du nombre de pôles dans la MRV 6/4 entraîne des interférences entre les phases, ce qui rend difficile le maintien de la stabilité du couple et réduit l'efficacité de la conversion électromagnétique.

Après avoir étudié les deux types de moteurs et analysé leurs principales caractéristiques notamment le couple, le courant absorbé et le rendement nous avons pu mettre en évidence les points forts et les différences entre eux. Cette comparaison nous a permis de mieux cerner le comportement de chaque moteur selon les exigences d'application.




Nous abordons à présent le troisième chapitre, qui traite de la commande du moteur à reluctance variable de type 6/4 par MATLAB-SIMULINK (Voir Annexe C). L'objectif est d'ajuster les paramètres de commande afin d'optimiser la forme du couple produit, en réduisant ses ondulations et en améliorant les performances globales du système.

## CHAPITRE 3

### La commande linéaire de la machine à Reluctance Variable 6/4 sous MATLAB-SIMULINK

### III.1 Introduction

Pour un entraînement de type déterminé, toute amélioration du comportement implique une action sur l'un des éléments constitutifs suivants:

-  Le moteur,
-  L'alimentation,
-  La commande.

L'alimentation a pour but d'appliquer la tension successivement aux bornes des diverses phases du moteur. Elle doit assurer l'enclenchement d'un bobinage sur ordre de commande. Elle doit également assurer la coupure du courant. Dans ce chapitre, on simule la machine à réluctance variable pour étudier son comportement dynamique en régime linéaire. La commande est par l'Hystérésis. Cela nous permet de choisir l'angle d'excitation optimal pour réduire l'ondulation du couple de la MRV.

### III.2 Modèle Linéaire de la MRV

Les caractéristiques électromagnétiques utilisées pour la simulation de la MRV 6/4 ont été obtenues par l'analyse éléments finis du chapitre (II). Les figures III.1, III.2, III.3 et III.4 montrent en détails la commande linéaire de la machine à réluctance variable sous MATLAB-SIMULINK [7].

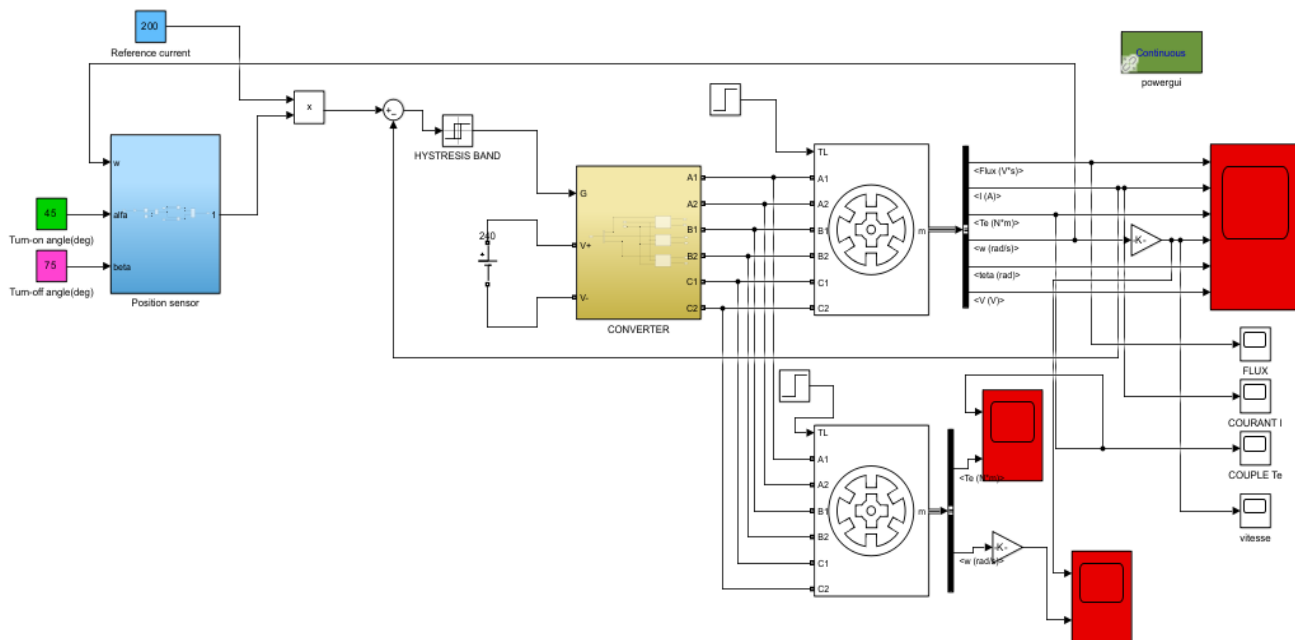


Figure III.1.a Schéma de la MRV 6/4

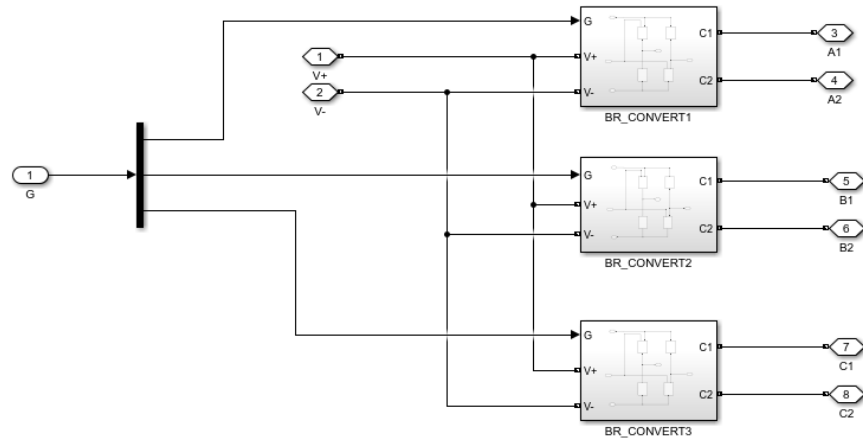


Figure III.1.b La commande linéaire de la MRV (schéma des 3 phases)

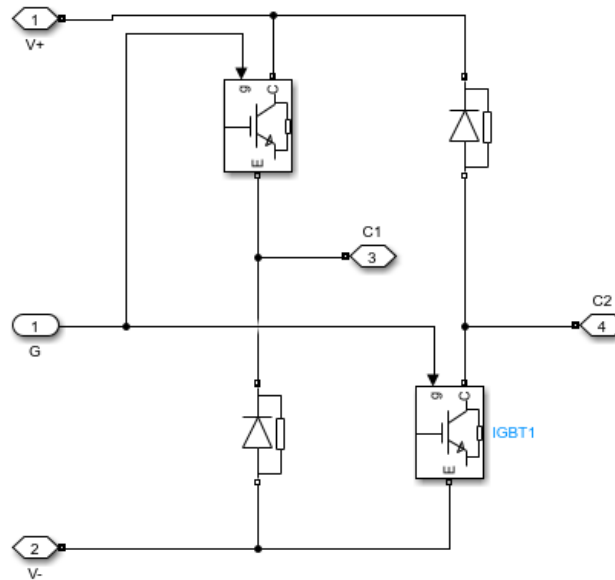


Figure III.1.c Circuit de commutation (schéma par phase)

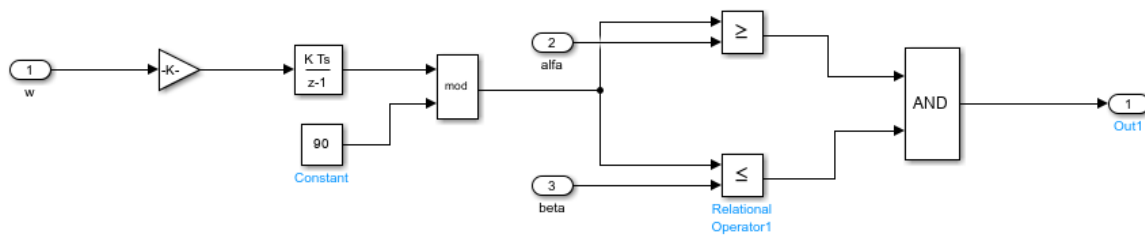


Figure III.1.d Logique de commande des interrupteurs (capteur de position)

### III.3 Commande du courant par hystérésis

Le comportement dynamique du MRV est illustré dans le cas de l'emploi de la commande du courant par hystérésis. Les résultats montrés ont été obtenus pour variation des angles de conduction  $\theta_{on}=40^\circ$ ,  $\theta_{off}=65^\circ$ , standards  $\theta_{on}=45^\circ$ ,  $\theta_{off}=75^\circ$  ainsi angles de distinction  $\theta_{on}=50^\circ$ ,  $\theta_{off}=90^\circ$  avec une charge de 40N et un courant de référence  $I_{ref} = 200A$ . Donc on obtenus les résultats suivants de couple, vitesse et on va interpréter ses résultats

#### III.3.1 Variation de couple, vitesse pour l'angle standard :

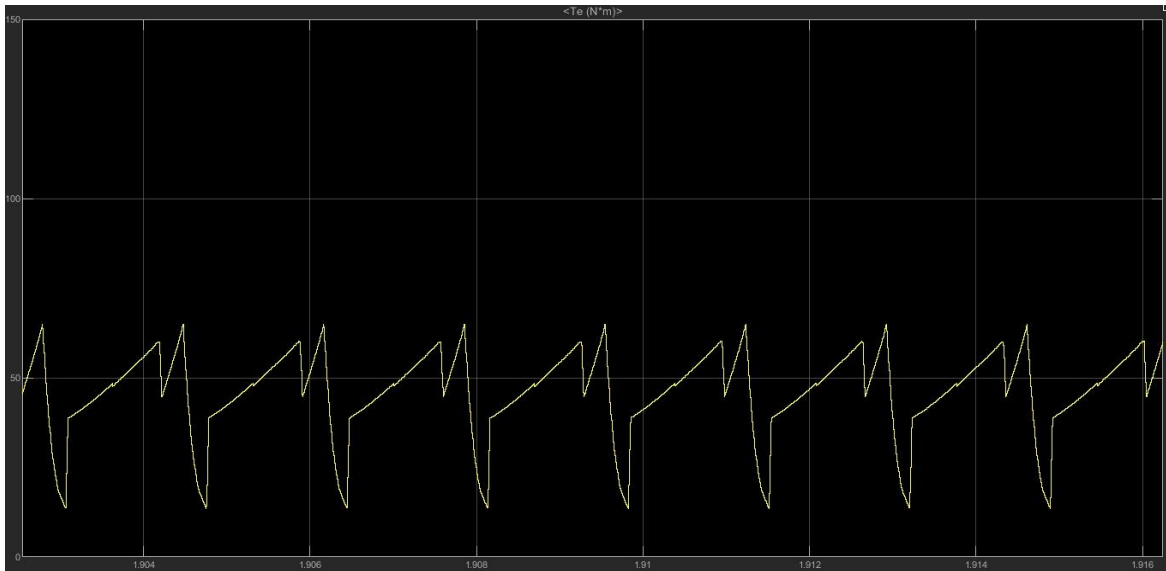


Figure III.2.a : le couple pour « angle standard »

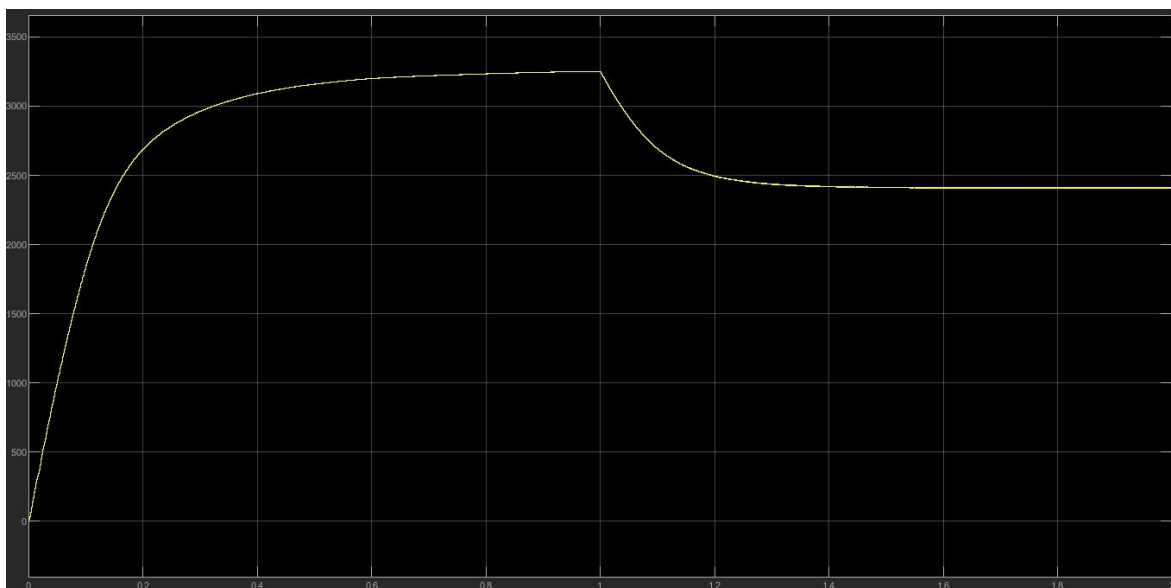


Figure III.2.b : la vitesse pour « angle standard »

Les figures III.2.a ; III.2.b montre que Le couple de sortie est donc beaucoup plus grand que le couple d'entrée et c'est un couple Très élevé.

La vitesse de sortie est très faible par rapport à la vitesse d'entrée, elle est Très faible (forte réduction).

### III.3.2 Variation de couple, vitesse pour l'angle de conduction

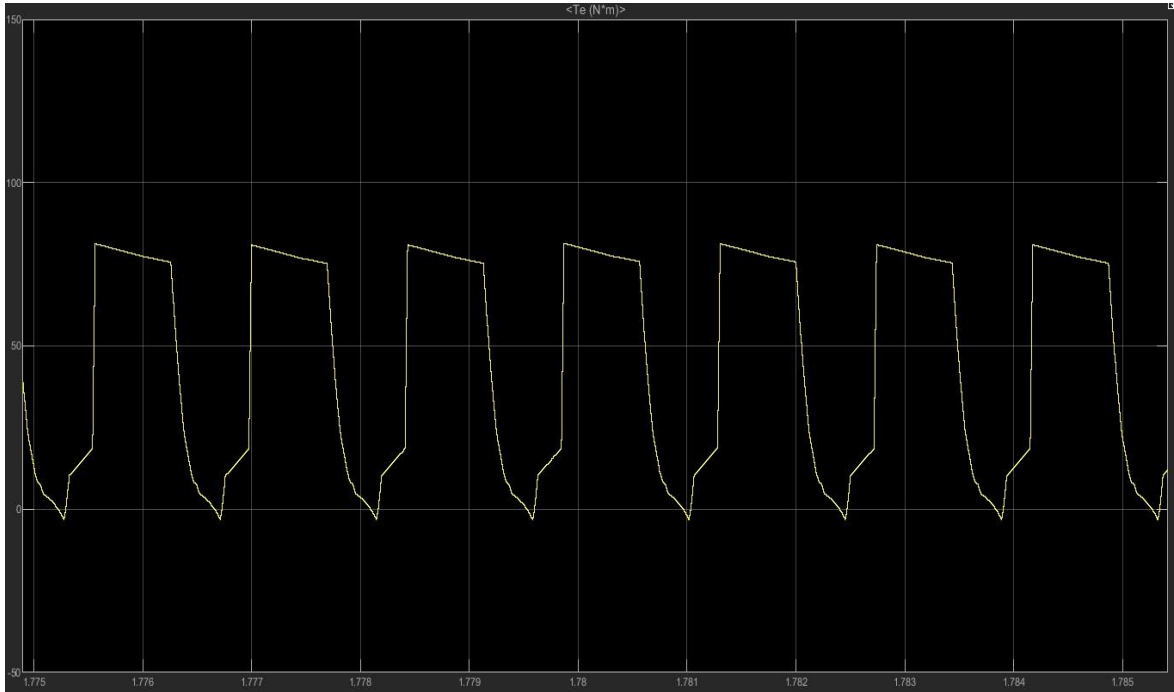


Figure III.3.a : le couple pour « angle de conduction »

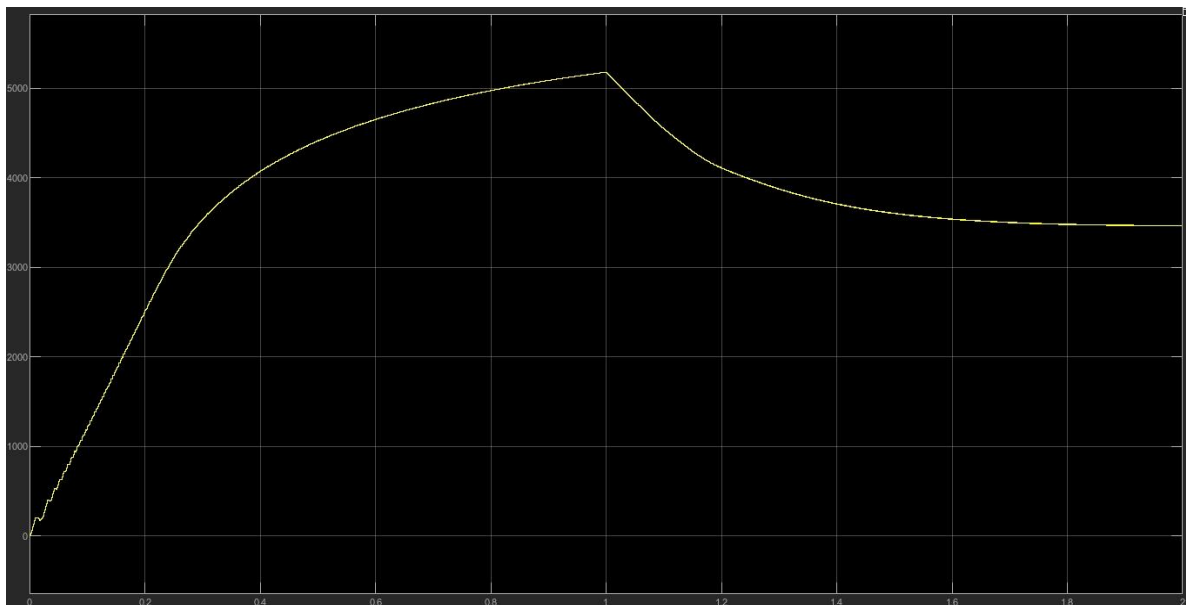


Figure III.3.b : la vitesse pour « angle de conduction »

Les figures III.3.a et III.3.b montre que l'ondulation du couple est élevée, cette Comme on peut le constater, le SRM présente une ondulation de couple très élevée, Cette ondulation de couple est dépend principalement des angles d'enclenchement et de déclenchement du convertisseur.

La vitesse Atteindre une valeur maximale environ de 1s et faire une diminution pas forcément progressive due à la variation faible d'angle.

### III.3.3 Variation de couple, vitesse pour l'angle de distinction

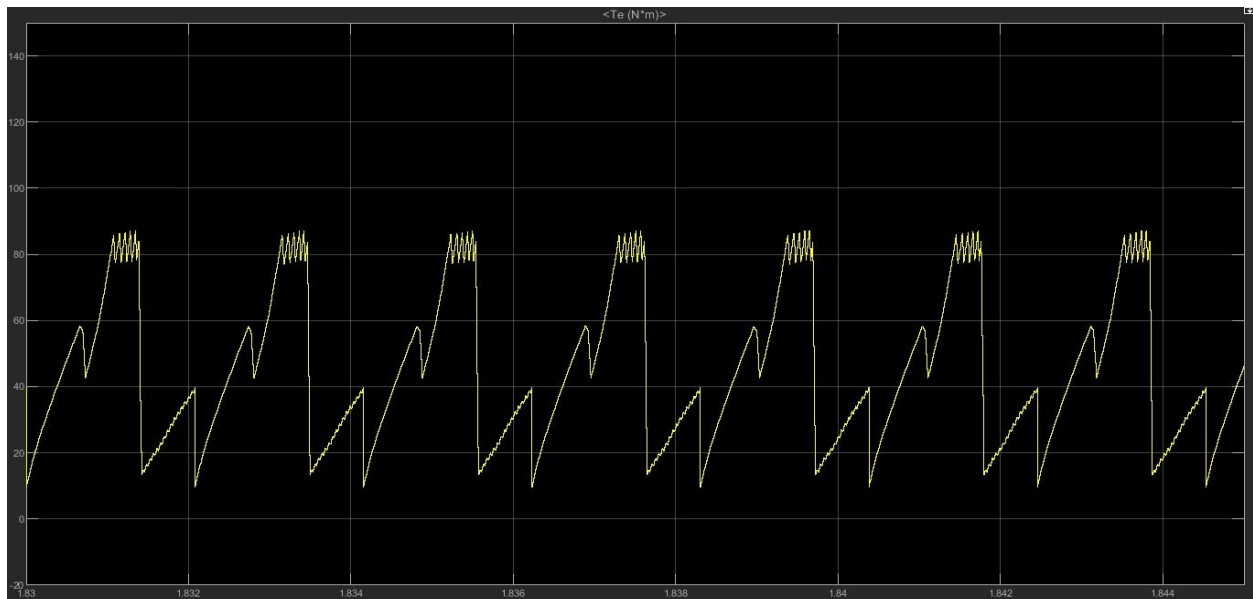


Figure III.4.a : le couple pour «angle de distinction »

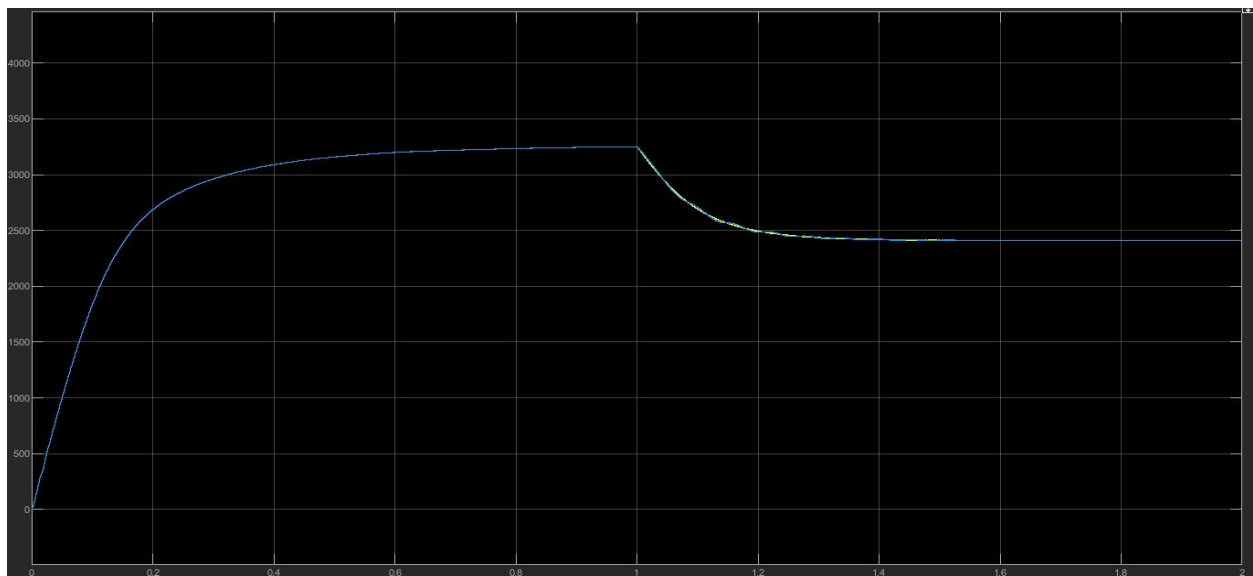


Figure III.4.b : la vitesse pour « angle de distinction »

Dans les figures III.4.a, III.4.b en constater que le couple est faible car un angle plus grand entraîne moins de couple de sortie par rapport au angle de conduction. Concernant la vitesse de sortie sera plus élevée comparée à un angle plus petit, car le rapport de réduction est plus faible.

## **II.4 Conclusion**

Dans ce troisième chapitre, nous avons mis en œuvre la stratégie de commande en linéaire sur un moteur à reluctance variable en utilisant MATLAB /Simulink. La première partie était dédiée à l'identification des stratégies de commande possibles, au choix de l'alimentation appropriée et à la conception de la commande. La deuxième partie a été consacrée à la mise en œuvre du programme de simulation du Convertisseur-Machine-Commande et à la présentation des résultats numériques les plus importants.

## Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons mené une étude comparative approfondie entre deux topologies de machines à réluctance variable (MRV), à savoir la MRV **10/4** et la MRV **6/4**, à l'aide de simulations numériques sous le logiciel **ANSYS Maxwell**. L'objectif principal était d'analyser les performances électromagnétiques de ces deux structures afin de déterminer leurs avantages respectifs, tout en étudiant également le comportement dynamique de la MRV 6/4 lorsqu'elle est soumise à une commande en boucle ouverte.

L'analyse comparative a montré que la **géométrie de la MRV joue un rôle déterminant** dans ses performances globales. La machine **10/4** présente un couple moyen plus élevé et une ondulation de couple relativement réduite, ce qui en fait un choix intéressant pour les applications nécessitant une puissance importante et une meilleure régularité mécanique. En revanche, la MRV **6/4**, bien que générant un couple moyen légèrement inférieur et une ondulation plus marquée, reste plus compacte, plus simple à concevoir et surtout plus répandue dans les applications industrielles en raison de son compromis entre simplicité de construction, rendement et facilité de commande.

Sur le plan électromagnétique, les résultats des simulations ont permis de comparer la distribution des flux magnétiques, la densité de flux au niveau des dents du stator et du rotor, ainsi que les pertes éventuelles. La MRV **10/4** se distingue par une meilleure exploitation de l'espace actif et une plus grande capacité à développer du couple pour un même courant d'excitation, alors que la MRV **6/4** se révèle plus flexible pour l'intégration dans des systèmes à vitesse variable.

En ce qui concerne la **commande en boucle ouverte appliquée à la MRV 6/4**, nous avons pu mettre en évidence le comportement dynamique de cette machine lorsqu'elle est alimentée par des signaux de commutation adaptés. Bien que cette commande soit simple à mettre en œuvre, elle présente certaines limites : l'absence de retour capteur entraîne une dépendance forte à la précision du calage électrique, et l'ondulation de couple se répercute directement sur la vitesse de rotation. Néanmoins, cette approche constitue une étape indispensable pour valider le modèle et préparer la mise en place de commandes plus évoluées en boucle fermée, telles que la commande basée sur la détection de position ou encore les stratégies de type DTC (Direct Torque Control).


En conclusion, ce travail nous a permis de **mieux comprendre les avantages et inconvénients des topologies MRV 10/4 et 6/4**, tout en mettant en évidence l'impact du choix de la commande sur les performances dynamiques de la machine. Si la MRV **10/4** se démarque par des performances électromagnétiques supérieures, la MRV **6/4** conserve un rôle prépondérant en raison de sa robustesse, de sa simplicité et de son adéquation avec des commandes peu coûteuses. Enfin, la réalisation de la commande en boucle ouverte sur la MRV 6/4 constitue une étape préparatoire prometteuse pour des perspectives futures visant à intégrer des stratégies de commande plus avancées et adaptées aux applications exigeantes telles que la traction électrique ou les systèmes à haute efficacité énergétique.

**Annexe A :****ANSYS MAXWELL**

**ANSYS Maxwell** est un logiciel de simulation électromagnétique basé sur la **méthode des éléments finis (FEM)**, spécialisé dans la modélisation des champs électromagnétiques **quasi-statiques** en régime **stationnaire ou transitoire**. Il est principalement utilisé pour la conception et l'analyse de machines électriques (moteurs, transformateurs, capteurs, etc.), des dispositifs électromécaniques, et des systèmes à haute fréquence à géométrie complexe. Il permet d'évaluer avec précision des grandeurs physiques comme l'induction magnétique, la densité de courant, les pertes, le couple, ou la force électromagnétique.

**Annexe B :**

**Les paramètres des de la machine 6/4 et la machine 10/4 dans ANSYS-MAXWELL**

 Pertes et commande

Perte de frottement	8W
Perte par frottement de l'air	4W
Vitesse de référence	1500 tr/min
Impulsion de déclenchement	120°
Chute de tension dans le transistor	0.5V
Chute de tension dans la diode	0.5V

 Rotor

Recouvrement magnétique	0.4
Épaisseur de la culasse magnétique	9mm
Diamètre extérieur du rotor	74mm
Diamètre intérieur du rotor	30mm
Longueur du rotor	65mm
Nombre de pôles du rotor	4

 Stator

Diamètre extérieur du stator	138mm
Diamètre intérieur du stator	75mm
Longueur du stator	65mm
Facteur d'empilement	0.95
Épaisseur de l'isolation	0.3mm
Nombre de spires par pôle	20

Enroulement du fil	0.08mm
Calibre du fil	1.628mm
Nombre de pôles du stator	6 pour 6/4 et 10 pour 10/4
Matériau utilisé pour le stator	Steel_1010
Matériau utilisé pour le rotor	M19

## Annexe C :

### MATLAB-SIMULINK

**MATLAB** (Matrix Laboratory) est un environnement de calcul numérique et un langage de programmation de haut niveau développé par **Math Works**, utilisé principalement pour le traitement des données, l'analyse numérique, l'algèbre linéaire, et le développement d'algorithmes. Il est largement employé dans les domaines de l'ingénierie, des sciences appliquées, et de la recherche.

**Simulink**, qui fait partie intégrante de MATLAB, est un environnement de simulation graphique basé sur des blocs, dédié à la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques multidisciplinaires. Il est particulièrement utilisé pour la conception de systèmes de commande, l'automatique, l'électronique de puissance, les systèmes embarqués, et la mécatronique.

Simulink permet aux ingénieurs de construire des **modèles multi-domaines**, d'exécuter des **simulations temporelles** et de générer du **code automatique** (via Simulink Coder ou Embedded Coder).

#### Les paramètres :

Modèle machine : 6/4

$P=60\text{KW}$ ,  $V=240\text{V}$ ,  $I_{\text{réf}}=200\text{A}$ ,  $f=50\text{Hz}$

$R_s=0.05\Omega$ ,  $N_r=4$ ,  $N_s=6$ ,  $m=3$

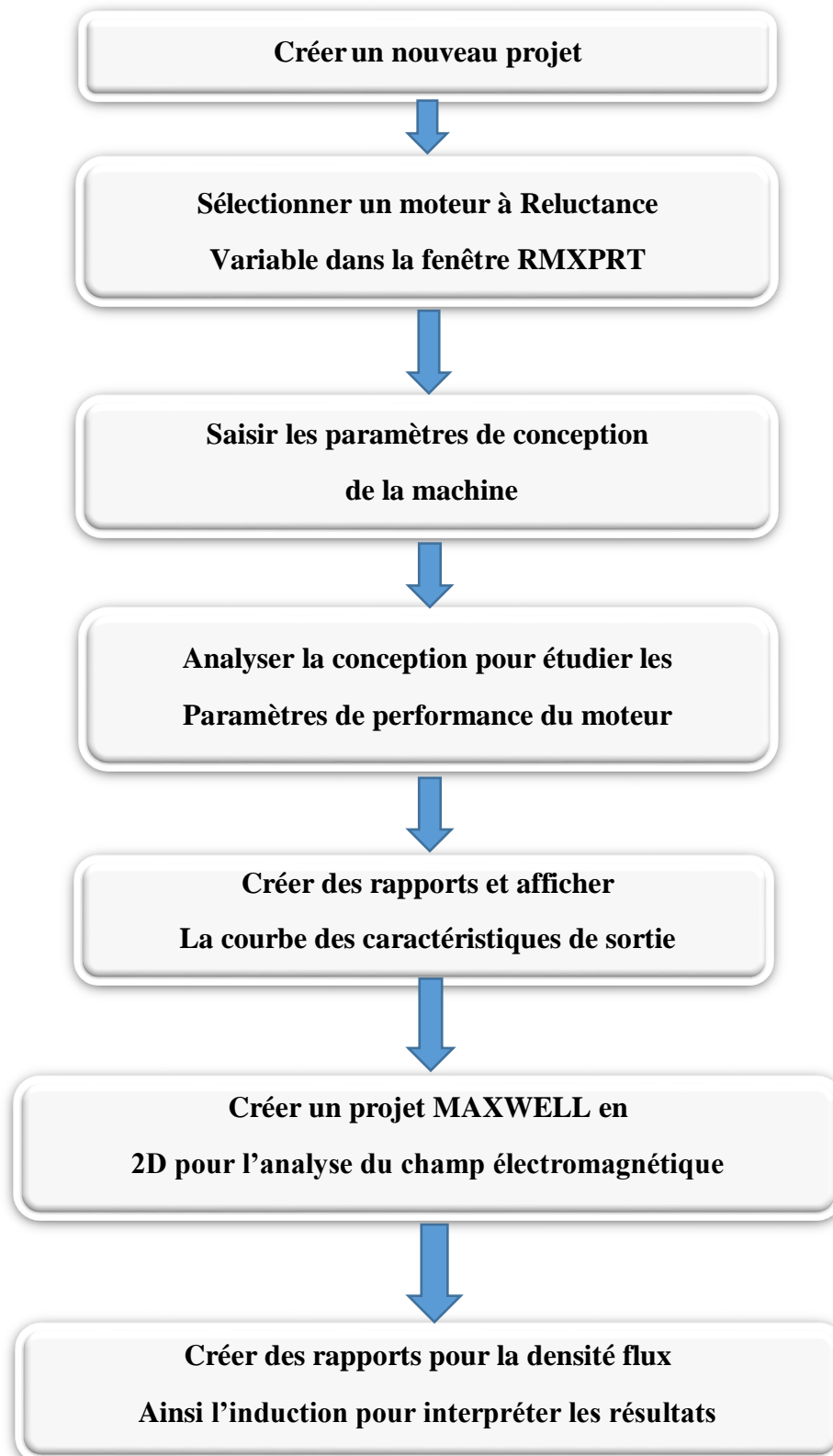
$J=0.02\text{Kgm}^3$

La charge = 40 N

Les angles :

- ✚ Conduction :  $\theta_{\text{on}}=40^\circ$  ;  $\theta_{\text{off}}=65^\circ$ .
- ✚ Standard :  $\theta_{\text{on}}=45^\circ$  ;  $\theta_{\text{off}}=75^\circ$ .
- ✚ Distinction :  $\theta_{\text{on}}=50^\circ$  ;  $\theta_{\text{off}}=90^\circ$ .

## Annexe D :

**La géométrie de la MRV dans ANSYS-MAXWELL**

## Bibliographie

- [1]: Gao.Y. "Speed control of switched reluctance motors". Thèse de magister .Université de hong kong, Aug 2000.
- [2] : Zineb.R "Modulation et commande vectorielle d'une machine à induction avec prise en compte et minimisation des pertes". Mémoire de magister, de Batna, Juin 2001.
- [3]: Krishnan, R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications.2001
- [4]: Ehsani, M., Ramani, K., & Fahimi, B. *Switched reluctance motor drives: A technology status review*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005.
- [5]: Murphy, A. (2008). Design of a switched reluctance machine drive for automotive applications (Doctoral dissertation, Dublin City University).
- [6]:Emmanuel.H. "Etude modélisation et mesure des pertes magnetique dans les moteurs à reluctance variable à double saillance" thèse de doctorat, université parise, décembre 1995.
- [7]: Wadah Abass Aljaism," SWITCHED RELUCTANCE MOTOR: DESIGN, SIMULATION AND CONTROL". School of Engineering DRG "Power Conversion and Intelligent Motion Control" University of Western Sydney.
- [8]: Chouitak M. (2017). Commande d'un moteur à reluctance variable par l'emploi de l'intelligence artificielle. The control of switched reluctance machine with the use of the artificial intelligence. Ph.D. Thesis. Faculté des sciences et de la technologie, Université d'Oran, Algeria.
- [12]: S. Allirani, H. Vidhya, T. Aishwarya, T. Kiruthika, and V. Kowsalya, "Design and performance analysis of switched reluctance motor using ANSYS Maxwell," 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), 2018, pp. 1427–1432.
- [13]: M.Dwarakanath, M. Shivalingaiah, and J. Koujalagi, "Performance Analysis of Switched Reluctance Motor With Different Core Materials," Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, vol. 7, no. 7, pp. 781–785, 2020.
- [15]: B.Bekkouche, A.Chaouch, Y.Mezari "A Switched Reluctance Motor Using Permeance Network Method" ISSN 0973-4562 Volume 1 Number 2 (2006) pp. 137-152.