



Faculté : TECHNOLOGIE
Département : ELECTROTECHNIQUE
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Commandes Électriques

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**Optimisation des angles de commande pour minimiser
les ondulations du couple dans les MRV**

Présenté par : *Kherbach Ilyes*

Encadrant : BENAMIMOUR Tariq

MCB

UBMA

Jury de Soutenance :

KELAIAIA Samia	MCA	UBMA	Président
BENAMIMOUR Tariq	MCB	UBMA	Encadrant
Ben Si Ali Nadia	PROF	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Résumé :

Dans ce travail, nous avons étudié un type des moteurs électriques appelé Machine à Reluctance Variable, concentrant particulièrement sur le problème des ondulations du couple électromagnétique, qui affectent directement les performances du moteur, notamment en termes de bruit, de vibrations et les pertes énergétiques. Pour y remédier, notre travail s'est appuyé à la fois sur une analyse théorique précise, accompagnée de simulations numériques à l'aide de logiciels spécialisés, afin d'améliorer ces caractéristiques électromagnétiques utilisant deux algorithmes d'optimisation différentes.

Mots clés : machine à reluctance variable, couple, optimisation, algorithme.

Abstract:

In this work, we studied a type of electric motor called a Variable Reluctance Machine, focusing particularly on the problem of electromagnetic torque ripples, which directly affect motor performance, particularly in terms of noise, vibration, and energy losses. To address this, our work relied on both a precise theoretical analysis and numerical simulations using specialized software to improve these electromagnetic characteristics using two different optimization algorithms.

Keywords: variable reluctance machine, torque, optimization, algorithm.

ملخص:

في هذا العمل، قمنا بدراسة نوع من المحركات الكهربائية يسمى آلة الممانعة المتغيرة، مع التركيز بشكل خاص على مشكلة تموجات عزم الدوران الكهرومغناطيسي، والتي تؤثر بشكل مباشر على أداء المحرك، وخاصة من حيث الضوضاء والاهتزازات وخسائر الطاقة. ولمعالجة هذه المشكلة، اعتمد عملنا على تحليل نظري دقيق، مصحوبًا بمحاكاة عددية باستخدام برامج متخصصة، بهدف تحسين هذه الخصائص الكهرومغناطيسية باستخدام خوارزميتين مختلفتين للتحسين.

الكلمات المفتاحية: آلة الممانعة المتغيرة، عزم الدوران، التحسين، الخوارزمية.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes parents

A toute ma famille, et amis...

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter...

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous

Et chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

Avec toute ma tendresse....

** Kherbaché Ilyes **

Remerciements

Avant tout, je remercie ” *Allah* ” le tout puissant pour la volonté et la patience qu’il m’a données pour accomplir ce mémoire

Un grand remerciement à mon encadrant ” *BENAMIMOUR Tariq* ” pour avoir accepté de diriger mon mémoire et pour les conseils fructueux, l’encouragement et l’orientation que tu m’as attribués.

Ma sincère reconnaissance à tous les membres du jury *Dr. KELALIA Samia* et , *Pr. Ben Si Ali Nadia*” pour l’honneur qu’ils me font en acceptant de présider et d’examiner ce mémoire.

Je remercie également toute l’équipe administrative du département de *Électrotechnique* à l’université de Badji Mokhtar Annaba,, et à toute la promotion Électrotechnique de ” *Commandes Électriques 2023-2024* ”.

Enfin, je remercie beaucoup ” *mes parents* ” pour leur soutien moral et leur encouragement tout au long de mes études. Je remercie également ” *mes sœurs*”, qui m’ont apporté leur soutien moral pendant la rédaction de mon mémoire. Sans oublier tous ” *mes proches amis*” et ” *les personnes* ” qui m’ont soutenu et aidé, même avec un mot gentil

★ *Kherbache Ilyes* ★

Acronymes

MRVDS	Machine à Reluctance Variable à double saillance
MRV	Machine à Reluctance Variable
L	L'Inductance
Ψ	Le flux magnétique
Θ	La position
Ω	La vitesse
N	Nombre de spire/phase
β_r et β_s	Les angles des dents rotoriques et statoriques
I	Le courant
Ce	Couple électromagnétique
Ns, Nr	Nombre des dents statoriques, rotorique
D	Diamètre d'alésage
D0	Diamètre extérieur
E	Épaisseur d'entrefer
hs	Hauteur de dent statorique
hr	Hauteur de dent rotorique
Wr	Largeur de dent rotorique
Ws	Largeur de dent statorique
Yr	Épaisseur culasse rotorique
Ys	Épaisseur culasse statorique
L	Longueur axiale de la machine
D	Diamètre de l'arbre rotorique
Lmax	L'inductance maximale
Lmin	L'inductance minimale
GA	Algorithme génétique
PSO	Optimisation par essaim particulaire

SOMMAIRE:

INTRODUCTION GENERALE.....

CHAPITRE I : Caractéristiques magnétiques des MRV

I.1. Introduction	
I.2. Constitution d'une MRV.....	
I.3 Différentes topologies de la MRV	
I.3.1. MRV à double saillance (Pures)	
I.3.2. Mrv Vernier :.....	
I.3.3. Mrv Hybrides.....	
I.4. Principe De Fonctionnement Des MRV	
I.4.2. La position d'opposition	
I.4.2 .la position de conjonction	
I.5. Applications des MRV	
I.6.Avantages et inconvénients de la MRV	
a. Les avantages.....	
b. Les inconvénients.....	
I.7. Conclusion.....	

CHAPITRE II : modélisation et simulation électromagnétiques de la mrv

II.1. Introduction.....	
II.2. Modélisation électromagnétique de la MRV.....	
II.3. Logiciel FEMM de résolution	
II.3.1. Présentation.....	
II.3. Paramètres de simulation	
II.3.3. Mise en œuvre et exploitation des résultats	
II.3.4. Tracé des différentes caractéristiques électromagnétiques.....	
II.4. Présentation de l'environnement MATLAB/Simulink.....	
II.5. MODÈLE NON-LINÉAIRE DE LA MACHINE.....	
II.6. Modèle non-linéaire de la MRVDS 6/4 sous MATLAB/SIMULINK	
II.7. Les résultats de la simulation	

II.8. Conclusion

CHAPITRE III : Optimization des angles de MRV

III.1.Introduction.....

III.2.Optimisation par essaim particulaire PSO.....

III.3.Base de la technique PSO.....

III.4.Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO.....

III.5.Organigramme de l'algorithme PSO.....

III.6.Optimisation par l'algorithme génétique (GA)

III.7.Base de la technique AG.....

III.8.Organigramme de l'algorithme AG.....

II.9.Conclusion

CONCLUSION GENERALE.....

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I :

Figure I.1. Constitution d'une MRV

Figure I.2. Construction de MRV à double saillance

Figure I.3. MRV à 2 dents par phase.

Figure I.4. MRV à plus de 2 dents par phase.

Figure I.5: MRV vernier à pôles statoriques dentés

Figure I.6: Intégration d'aimants dans les machines à double saillance

Figure I.7 Position d'opposition et position de conjonction

Figure I.8. Mouvement continu de rotation d'une MRV 6/4

Figure I.9: Les applications spécifiques.

Figure I.10 : Les appareils ménagers.

Figure I.11. Moteur hybride destiné à la tractio

Figure I.12. Moteur « in Wheel » pour véhicules

Figure I.13. Portes automatiques

Figure I.14. MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle

Figure I.15. Moteur d'entraînement à RV directement couplé au compresseur rotatif à vis et à la pompe

CHAPITRE II :

Figure II.1: Représentation schématique des paramètres géométriques

Figure II.2: Organigramme résumant les différentes étapes de calcul dans FEMM

Figure II.3: Courbe B(H) du matériau ferromagnétique utilisé.

Figure II.4: Maillage de la MRVDS selon FEMM.

Figure II.5: Distribution des lignes de champ pour les deux positions extrêmes.

Figure II.6: Densité de champ magnétique en conjonction

Figure II.7: Densité de champ magnétique en opposition.

Figure II.8: Caractéristiques flux $\Phi(i)$ paramétrées avec la position.

Figure II.9: Caractéristiques couple $C(\theta)$ paramétrées selon l'excitation.

Figure II.10: Caractéristiques inductance $L(\theta)$ paramétrées selon l'excitation

Figure II.11 : Caractéristiques flux $\Phi(\theta)$ paramétrées selon l'excitation

Figure II.12 a: Caractéristique couple/position/courant

Figure II.12 b: Caractéristique flux/position/courant

Figure II.13 : Schéma-bloc de simulation de la machine complète

Figure II.14 : Schéma-bloc de simulation d'une seule phase

Figure II.15 : Couple totale généré par les 3 phases de la MRVDS 6/4

Figure II.16 : Couple généré par une seule phase obtenue sous Simulink

Figure II.17 : Courants des trois phases

Figure II.18 : Courant de la phase (C).

Figure II.19 : La vitesse de rotation en (rad/s)

CHAPITRE III :

Figure III.1: Mécanisme de déplacement d'une particule

Figure III.2: Organigramme de base de la méthode PSO

Figure III.3 :Schéma synoptique de l'algorithme PSO appliqué

Figure III.4 :Couple maximum, couple minimum et couple moyen

Figure III.5 :Résultat de calcul utilisant PSO

Figure III.6: Organigramme de base de l'algorithme génétique

Figure III.7 :Schéma synoptique de l'GA appliqué

Figure III.8 :Capture écran de l'algorithme appliqué

Figure III.9 :Résultats de calcul utilisant GA

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau II.1 Paramètres géométriques

Tableau II.2 : Flux calculé par simulation sous FEMM

Tableau II.3 : Couple calculé par simulation sous FEMM

Tableau II .4 : Inductance calculé par simulation sous FEEM

Tab III.1 :Résultat de calcul utilisant PSO

Tab III.2 :Résultat de calcul utilisant GA

INTRODUCTION GENERALE

Avec l'essor de l'électromagnétisme au XIX^e siècle, de nombreux dispositifs fondés sur le principe de la **réluctance variable** ont été développés. Certains auteurs considèrent même ce principe comme l'un des premiers utilisés pour la conversion de l'énergie électromagnétique en énergie mécanique [1].

Dès 1834, le physicien russe **Moritz Hermann Jacobi** propose une structure tournante exploitant ce principe. Parallèlement, l'Américain **C. Grafton Page** conçoit plusieurs dispositifs à fer tournant. Toutefois, ces systèmes reposaient sur des commutateurs mécaniques, engendrant bruit et étincelles, ce qui représentait un inconvénient majeur.

En 1845, **C. Froment** réalise un dispositif rotatif considéré comme un précurseur direct des actuelles machines à réluctance variable. Cependant, ces dernières furent rapidement éclipsées par les machines à courant continu et à courant alternatif, en grande partie à cause des limitations liées à la commutation mécanique.

Ainsi, les domaines d'application des machines à réluctance variable demeurèrent longtemps restreints à :

- L'horlogerie (horloge FROMENT, 1854)
- Les rasoirs (société REMINGTON)
- Les tourne-disques (les Établissements RAGONOT)
- Le domaine des jouets avec les moteurs FROMENT

Cependant, ces machines ne furent pas complètement abandonnées. Dès cette époque, leurs qualités intrinsèques, telles que la simplicité de leur conception et leur robustesse, étaient déjà reconnues [2].

Vers 1927, les machines à réluctance variable revinrent sur le devant de la scène à la faveur d'une publication détaillant des dispositifs de transmission de mouvement utilisés dans les navires de guerre.

Dans les années 1960, en Angleterre, un regain d'intérêt pour ces moteurs s'est manifesté [2], marquant probablement le point de départ des recherches menées par plusieurs équipes universitaires, notamment à Leeds et Nottingham.

Au début, **Lawrenson**, considéré comme le pionnier de la recherche moderne sur les machines à réluctance variable (MRV), ainsi que son équipe à l'Université de Leeds, peinaient à convaincre la communauté scientifique. Toutefois, avec le temps, leur travail devint indiscutable, en particulier lorsque Lawrenson quitta le milieu académique pour fonder sa propre usine de production, démontrant ainsi concrètement les avantages de ces machines ainsi que la diversité de leurs applications.

Durant les années 1970, l'émergence de l'électronique de puissance permit de remplacer les encombrants commutateurs mécaniques par des circuits électroniques plus rapides, fiables, silencieux et sûrs. Ce progrès signa le véritable début de l'âge d'or des machines à réluctance variable [3].

Notre travail consiste à étudier la machine MRV 6/4 avec ses différentes caractéristiques :

Dans le premier chapitre, nous présentons, une recherche bibliographique sur les différents topologies de machines à réluctance variable et le principe de fonctionnement pour une structure de MRV . ainsi qu'une présentation des avantages et inconvénients avec quelques applications dans l'industrie.

Ensuite ,le chapitre II suivant des aspects liés à la modélisation de la machine par la méthode des éléments finis et la simulation dynamique de la machine sous environnement MATLAB/Simulink Enfin , Dans le troisième chapitre, nous avons optimiser les angles du MRV afin de réduire les ondulations du couple électromagnétique en utilisant l'algorithme génétique et l'algorithme PSO.

CHAPITRE I

Caractéristiques magnétiques des MRV

I.1. Introduction :

La machine à réluctance variable (MRV) tire son nom du principe selon lequel son couple moteur est généré par la variation de la réluctance magnétique. Bien qu'ancien, ce concept est resté en retrait par rapport aux machines exploitant la force de Lorentz. Cependant, la MRV se distingue par sa simplicité, l'absence d'aimants permanents, sa résistance aux hautes températures et sa large plage de vitesse. Ses principaux inconvénients restent l'ondulation du couple, les vibrations et le bruit acoustique. Grâce aux avancées technologiques, elle suscite un intérêt croissant. Ce chapitre explore ses différents topologies sa structure, son fonctionnement, ses avantages, ses inconvénients et ses applications.

I.2 Constitution d'une MRV:

Les machines à réluctance variable étudiées dans ce travail sont caractérisées par une double denture, avec un rotor comportant N_r dents et un stator bobiné constitué de N_s dents. Une particularité notable de ces machines est l'absence de circuit d'excitation. Les deux pièces polaires, quant à elles, sont constituées d'un empilement de tôles en matériau ferromagnétique. [4]

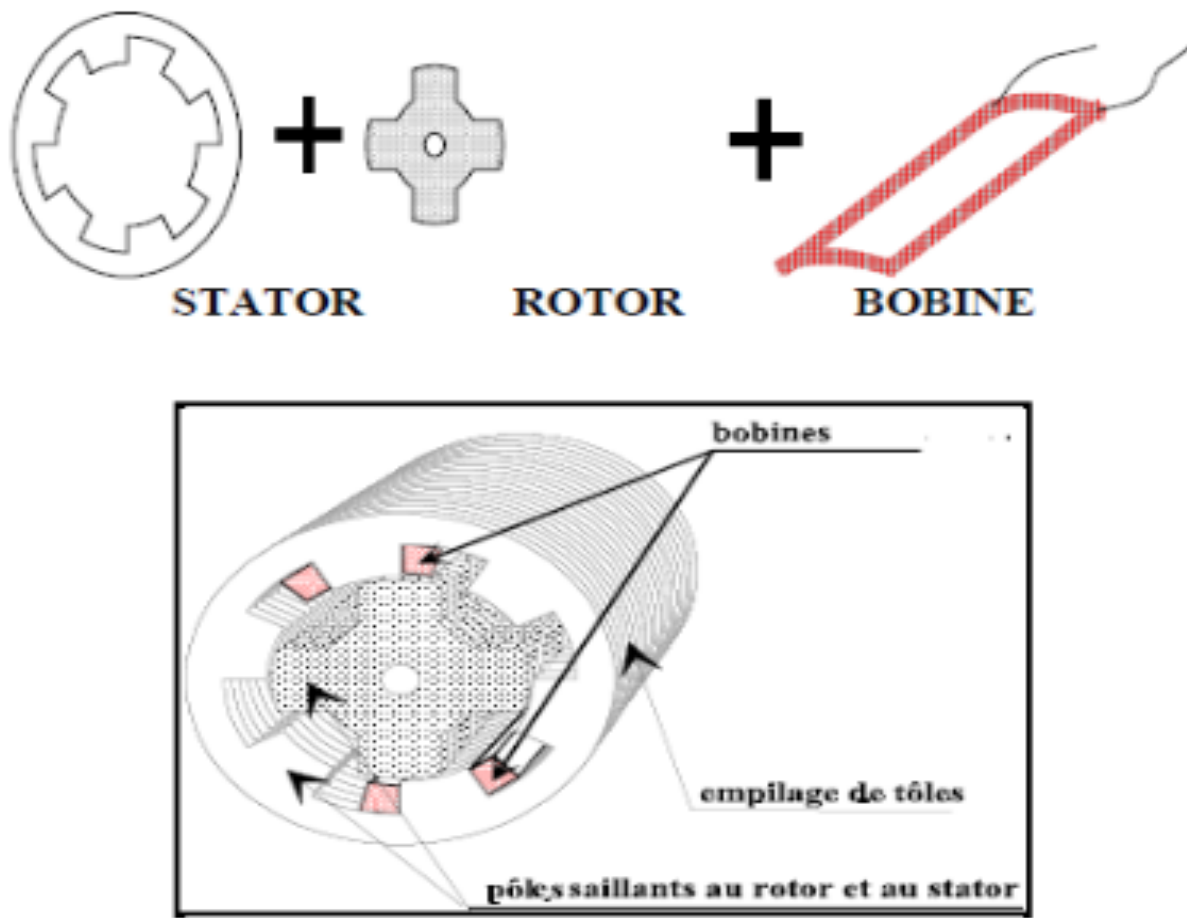


Figure I.1. Constitution d'une MRV

I.3 Différentes topologies de la MRV :

La simplicité du principe de fonctionnement des machines à réluctance variable (MRV) permet de développer diverses variantes de leur structure, offrant ainsi aux ingénieurs et aux chercheurs

une grande liberté pour concevoir de nouveaux concepts. Il est donc essentiel de préciser le type de MRV auquel on fait référence. Actuellement, trois structures attirent particulièrement l'attention en raison de leur simplicité de fabrication, ce qui permet de réduire les coûts. Il s'agit des **MRV à double saillance (Pures)**, des **MRV Vernier** et des **MRV hybrides**.

I.3.1 MRV à double saillance (Pures) :

Les machines à réluctance variable (MRV) pures se composent de deux parties principales : **le rotor**, qui est la partie mobile constituée de laminations en matériau ferromagnétique, sans aimant permanent ni enroulements, et **le stator**, qui comporte des pôles saillants équipés d'enroulements inductifs. La conception d'une MRV pure est illustrée dans la figure I.2 .

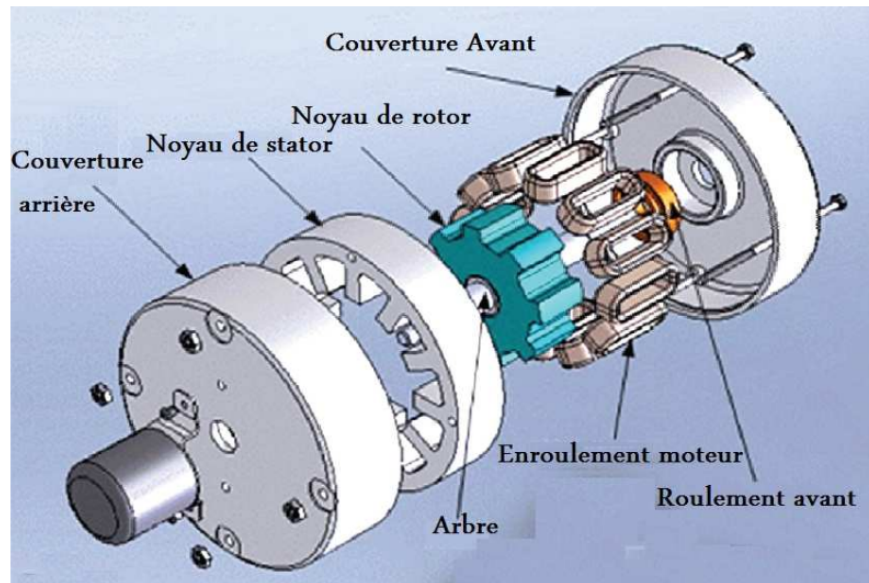


Figure I.2. Construction de MRV à double saillance

Il existe différents types de structures à réluctance pure, tels que les structures à double denture "simple" avec 2 dents par phase (Figure I.3), les structures à double denture "simple" avec plus de 2 dents par phase (Figure I.4), ainsi que les structures à pôles statoriques dentés où un seul bobinage excite plusieurs dents à la fois, appelé "bobinage global".

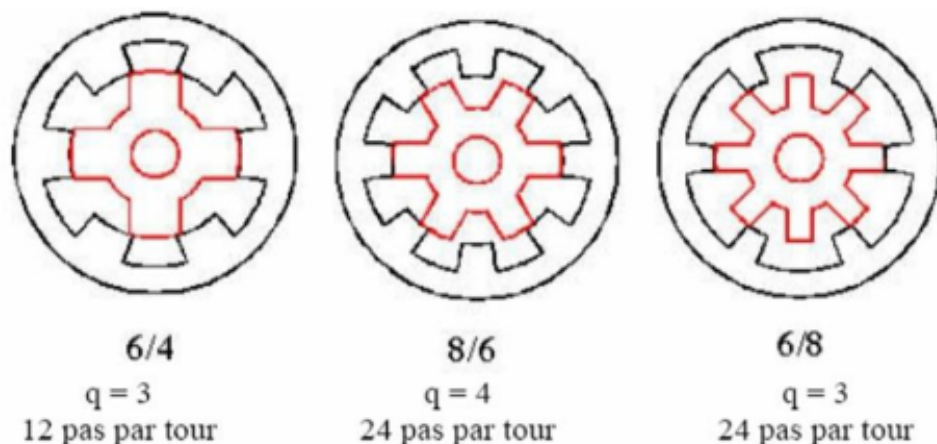


Figure I.3. MRV à 2 dents par phase.

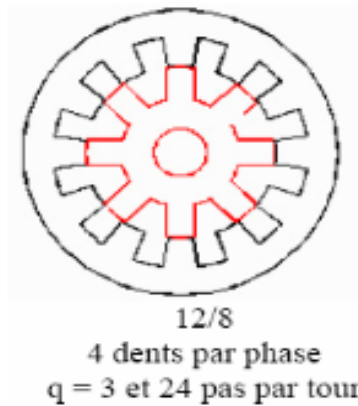


Figure I.4. MRV à plus de 2 dents par phase.

Elle se distingue par un rapport couple/masse élevé et une conception simple, ce qui lui confère un coût réduit et une robustesse accrue. Grâce à ces atouts, elle est largement utilisée dans l'industrie, notamment pour les systèmes de démarreur-alternateur des véhicules hybrides et des avions, ainsi que pour la production d'électricité dans les domaines de l'éolien et de l'aérospatial[5]

I .3.2. Mrv Vernier :

Certaines machines de type Vernier présentent une architecture comparable à celle des machines à réluctance variable (MRV) classiques, à la différence qu'elles sont alimentées par un courant alternatif sinusoïdal plutôt que par un signal en créneaux. On distingue principalement deux catégories de ces machines : les Vernier à grand nombre de dents, dans lesquelles le stator et le rotor possèdent un nombre de dents légèrement différent afin de générer une perméance de forme sinusoïdale (Figure I.5), et les Vernier à grosses dents, où chaque dent du stator correspond à un pôle. Ces machines, caractérisées par un faible nombre de pôles, présentent des performances en termes de couple et de vitesse comparables à celles des machines asynchrones ou des machines synchrones à aimants permanents, pour des fréquences d'alimentation similaires.[6]

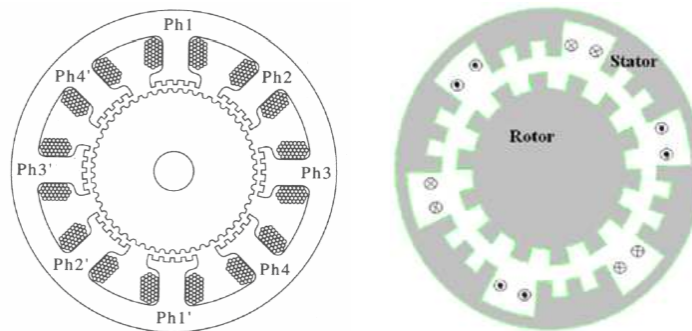


Figure I.5: MRV vernier à pôles statoriques dentés

I .3.3. Mrv Hybrides :

Contrairement aux structures précédentes, la particularité des MRV hybrides réside dans l'intégration d'aimants permanents visant à améliorer leurs performances. L'ajout de ces aimants aux structures à double saillance permet de compenser un entrefer excessif, bien que cela les éloigne des machines à réluctance pure. On distingue toutefois deux variantes de machines à double

saillance avec aimants, issues des MRVDS : la première intègre des aimants au niveau du rotor [7], ce qui la rapproche des machines synchrones à aimants internes (*Interior Permanent Magnet*). La seconde conserve un rotor passif similaire à celui des MRV pures, mais intègre des aimants au niveau du stator [8], donnant ainsi naissance à une machine à double saillance avec aimants permanents statoriques (DSPMM), également connue sous le nom de "MRV polarisée".

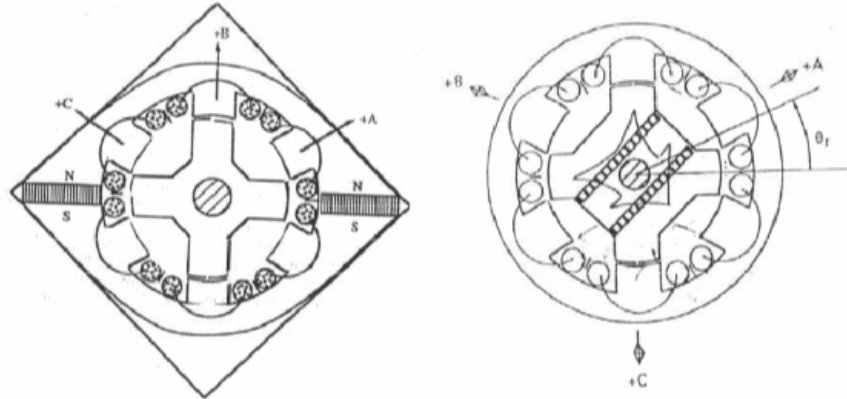
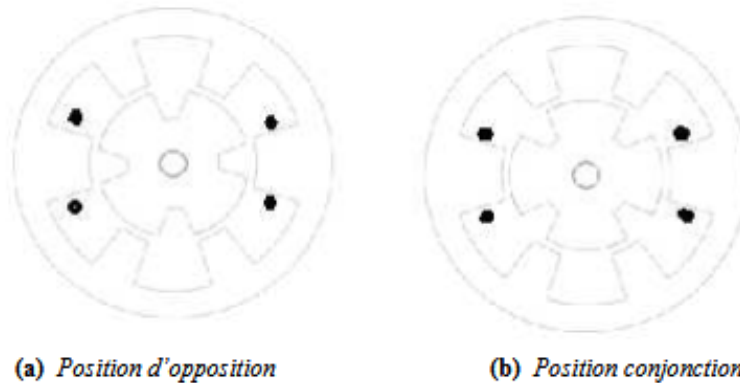


Figure I.6: Intégration d'aimants dans les machines à double saillance

I.4. Principe De Fonctionnement Des MRV :

Le fonctionnement des machines à réluctance variable (MRV) repose sur la variation de l'énergie magnétique entre deux positions caractéristiques : la position de conjonction (ou d'alignement) illustrée en Figure I.7(a), et la position d'opposition (ou de non-alignement) représentée en Figure I.7(b). Lorsqu'un courant est injecté entre ces deux positions, le rotor tend à se déplacer vers la position de conjonction, où la réluctance est minimale, afin de favoriser le passage du flux



magnétique.

(a) Position d'opposition

(b) Position conjonction

Figure I.7 Position d'opposition et position de conjonction

• I.4.1. Dans une position d'opposition :

le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale.

• I.4.2. Dans une position de conjonction :

le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale

► Typiquement, les machines à réluctance variable (MRV) présentent un nombre inégal de pôles saillants entre le stator et le rotor. À cet effet, des règles spécifiques régissent le choix du nombre de dents statoriques N_s , de dents rotoriques N_r , ainsi que du nombre de phases N_p , afin de garantir un fonctionnement optimal de la machine. Lorsque le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, l'application d'un

courant dans l'enroulement d'excitation modifie l'état énergétique du système, qui tend alors à atteindre une configuration de réluctance minimale, correspondant à un flux magnétique maximal. Ce phénomène entraîne un déplacement du rotor vers la position de conjonction. À titre d'exemple, pour une MRV avec $N_s=6$, $N_r=4$, on obtient un mouvement rotatif continu selon un schéma de commutation adapté.[9] :

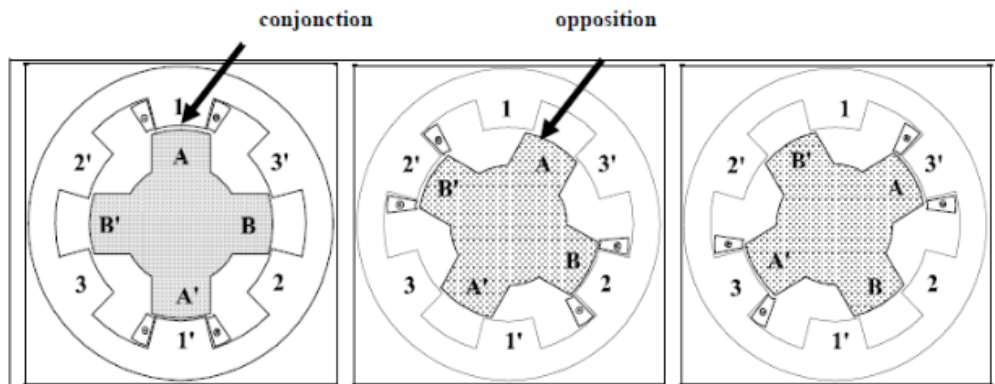


Figure I.8. Mouvement continu de rotation d'une MRV 6/4

- L'alimentation de la phase 1 aligne AA' avec 11'.
- L'alimentation de la phase 2 aligne BB' avec 22'.
- L'alimentation de la phase 3 aligne AA' avec 3'3.

I.5. Applications des MRV :

De manière générale, le MRV offre de nombreux avantages et peut être utilisé efficacement comme moteur à vitesse variable. Il constitue une solution adaptée à diverses applications, notamment pour les systèmes de traction de petite taille, offrant des performances remarquables avec des puissances pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilowatts. Grâce à sa polyvalence, le MRV représente une alternative intéressante dans de nombreux domaines d'application, parmi lesquels on peut citer[10] :

- **Les applications spécifiques** : compresseurs, ventilateurs, pompes. Les équipements médicaux et de laboratoires comme les pousse-seringues, les centrifugeuses ...(Figure I.9), ainsi que les fauteuils roulants électriques



pousse-seringue



fauteuil roulant électrique



compresseurs

Figure I.9: Les applications spécifiques.

- **Les appareils ménagers:** Robot ménager, lave-vaisselle...(Figure I.10) ,lave-linge...horlogerie, jouets.



lave-vaisselle



Robot ménager

Figure I.10 : Les appareils ménagers.

- **Les applications pour les véhicules électriques et hybrides** (Figure I.11), le domaine de traction électrique sur rails comme les MRV linéaires ainsi que les rotors << in Wheel >> directement associés aux roues (Figure I.12) et les équipements de bord .

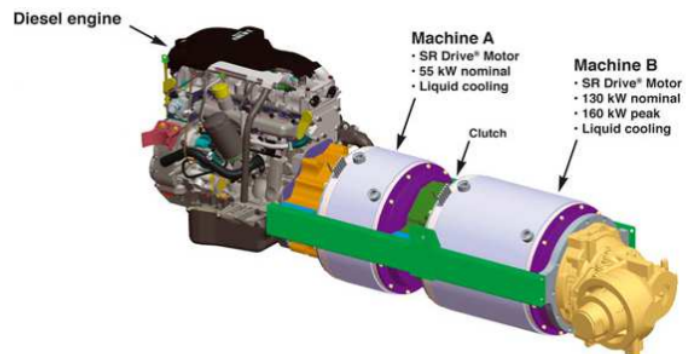


Figure I.11. Moteur hybride destiné à la tractio



Figure I.12. Moteur « in Wheel » pour véhicules

Les automatismes industriels : ascenseurs , servomécanismes, portes automatiques (figure I.13), actionneurs, positionnement...



Figure I.13. Portes automatiques.

Applications de pompes et compresseurs (Figure I.14) et (Figure I.15) :

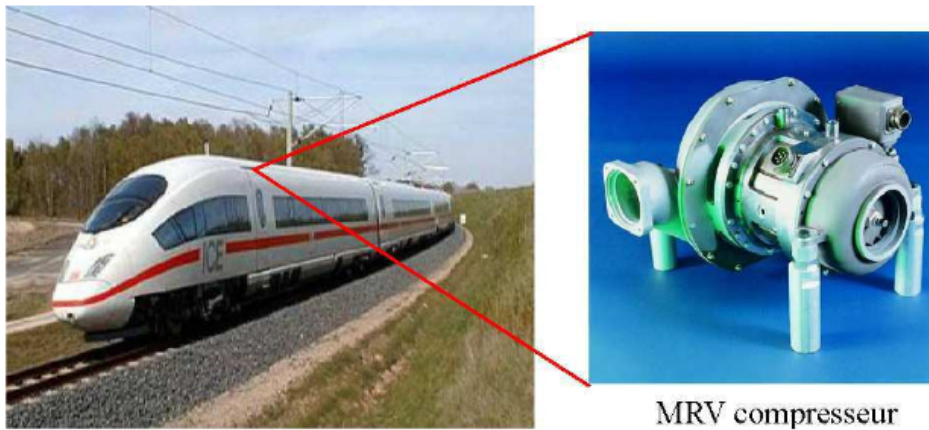


Figure I.14. MRV utilisée dans le train à grande vitesse pour la climatisation de l'air cycle



Figure I.15. Moteur d'entraînement à RV directement couplé au compresseur rotatif à vis et à la pompe

- 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 etaérospatiaux ;

Le manque d'une atmosphère dans l'espace fait que le moteurélectronique est le seul choix viable pour les systèmes de propulsion des robots d'exploration spatiale . L'agence NASA pour son programmed'exploration de mars a conçu un MRV pouvant supporter unetempérature de 540° pendant 27heures

I.6.Avantages et inconvénients de la MRV :

a. Les avantages

Les machines à réluctance variable (MRV) présentent plusieurs avantages significatifs :

- La structure du rotor est à la fois simple et robuste, ne comportant ni enroulements, ni conducteurs, ni aimants permanents. Cette conception contribue à la réduction de la masse du moteur et à l'amélioration de sa fiabilité.
- Sur le plan mécanique, le faible moment d'inertie du rotor permet d'atteindre des accélérations élevées. Sur le plan thermique, les pertes rotoriques limitées facilitent le refroidissement du système.
- Ces machines présentent d'excellentes performances dans des environnements extrêmes, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications à haute température et à grande vitesse.
- Elles disposent d'une forte capacité de surcharge à court terme, uniquement limitée par la température maximale admissible des bobinages et la saturation magnétique des matériaux. Cela permet de fournir un couple de démarrage élevé ou d'assurer une accélération rapide.
- Le coût de fabrication ainsi que celui de la maintenance sont généralement inférieurs à ceux des autres types de machines électriques.
- L'efficacité énergétique est maintenue sur une large plage de puissances, ce qui en fait une solution pertinente pour les applications dans les véhicules hybrides et électriques.
- Chaque phase d'alimentation étant indépendante, la fiabilité globale du système s'en trouve renforcée. En cas de défaillance d'une phase, la machine peut continuer à fonctionner avec un impact limité sur les autres phases.
- Enfin, la durée de vie des MRV est généralement très élevée, ce qui constitue un atout majeur pour les applications industrielles exigeantes.

b. Les inconvénients :

Les machines à réluctance variable (MRV) présentent certains inconvénients qui limitent leur déploiement industriel. Parmi les principaux obstacles identifiés dans la littérature, on peut citer :

- **Ondulation de couple, vibrations et bruits acoustiques** : Ces phénomènes sont généralement plus prononcés que dans les machines asynchrones ou les moteurs à aimants permanents. Néanmoins, diverses méthodes, tant actives que passives, ont été développées afin de compenser et d'atténuer ces effets indésirables.
- **Fonctionnement à faible vitesse** : Une exploitation efficace des MRV à basse vitesse nécessite un profil complexe de l'onde de courant ainsi que des mesures extrêmement précises de la position du rotor, conditions indispensables pour garantir un contrôle optimal.[11]

I.7. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les différentes topologies des machines à réluctance variable (MRV), en détaillant leur structure, leurs conditions de fonctionnement, ainsi que quelques-unes de leurs applications industrielles, sur la base d'une revue bibliographique approfondie. Le principe de fonctionnement, les avantages, les limitations et les domaines d'application des MRV ont également été exposés.

Dans le cadre de cette première approche, nous avons choisi d'étudier une structure simple mais largement documentée dans la littérature en raison de ses nombreux atouts : la MRV à double saillance comportant six dents au stator et quatre dents au rotor, communément désignée sous l'appellation MRVDS 6/4.

Après avoir établi les fondements théoriques relatifs à son fonctionnement, le chapitre suivant (Chapitre II) portera sur la modélisation de cette machine par la méthode des éléments finis, ainsi que sur l'analyse de son comportement dynamique à travers des simulations sous l'environnement MATLAB/Simulink.

CHAPITRE II

Modélisation et simulation électromagnétiques de la MRV

II.1 Introduction :

La modélisation de notre prototype MRVDS 6/4 à l'aide de la méthode des éléments finis (FEMM) permet d'analyser ses propriétés magnétiques, notamment le flux magnétique et le couple électromagnétique, en prenant comme variables la position angulaire du rotor et le courant de phase i . Cette méthode est particulièrement bien adaptée à l'étude de structures complexes intégrant des matériaux magnétiques non linéaires, grâce à sa capacité à calculer précisément le potentiel vecteur magnétique. En adoptant certaines hypothèses simplificatrices, comme la négligence des effets d'extrémité, l'analyse sera effectuée en deux dimensions (2D). L'exploitation de FEMM dans l'environnement Flux-2D facilitera l'évaluation des performances de la machine, en fonction de la position θ et du courant(i), ce qui permettra également d'en déduire les variations d'inductance. Par ailleurs, logiciel MATLAB/SIMULINK sera utilisé pour présenter une simulation analytique en régime non linéaire de la MRV.

II.2 Modélisation électromagnétique de la MRV :

Dans cette partie, nous allons présenter la modélisation d'un prototype réel de la MRV en utilisant la méthode des éléments finis, à la fois dans les cas magnétostatique et magnétodynamique. La modélisation magnétostatique débutera par une analyse du comportement électromagnétique de la machine dans ses deux positions extrêmes : la position alignée et la position non alignée (opposition et conjonction). Par la suite, les courants appliqués au circuit externe seront ajustés selon différentes positions angulaires du rotor, permettant ainsi de passer progressivement de l'alignement au non-alignement. Cette approche permettra de déterminer les caractéristiques statiques du circuit magnétique dans un contexte non linéaire. Afin de mettre en évidence les phénomènes dynamiques et de calculer le couple total, une modélisation dynamique sera également effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis, en tenant compte du couplage avec le circuit externe ainsi que des effets de saturation du circuit magnétique. Par ailleurs, l'environnement Matlab-Simulink sera utilisé pour estimer le couple dynamique à partir des résultats de courant électrique et du couple statique, à l'aide de la technique de la table de consultation[12].

Intitulé	Notation	Dimension
Nombre de dent statoriques	N_s	6 pôles
Nombre de dent rotoriques	N_r	4 pôles
Nombre de spire/phase	N	374 tours
Diamètre d'alésage	D	0.0994 [m]
Diamètre extérieur	D_0	0.1988 [m]
Épaisseur d'entrefer	E	$2.5e-4$ [m]
Hauteur de dent statorique	H_s	0.0368 [m]
Hauteur de dent rotorique	H_r	0.0166 [m]
Largeur de dent rotorique	W_r	0.0256 [m]
Largeur de dent statorique	W_s	0.0257 [m]
Épaisseur culasse rotorique	Y_r	0.0128 [m]
Longueur axiale de la machine	L	0.0500[m]
Diamètre de l'arbre rotorique	D	0.0994[m]
Épaisseur culasse statorique	Y_s	0.0126[m]

Tableau II.1 Paramètres géométriques

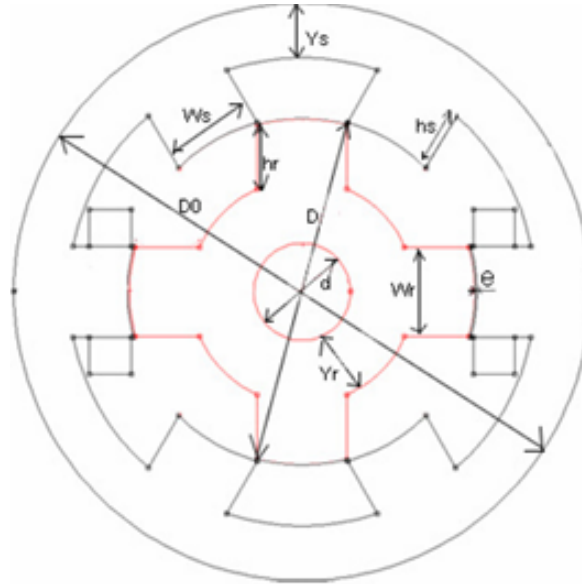


Figure II.1: Représentation schématique des paramètres géométriques.

II.3. Logiciel FEMM de résolution :

II.3.1. Présentation :

Le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) constitue un ensemble d'outils destinés à la résolution de problèmes d'électromagnétisme basse fréquence dans des domaines bidimensionnels ou axisymétriques. Développé par David Meeker, ce logiciel est disponible en libre téléchargement sur Internet. FEMM se compose de trois modules principaux :

► **femm.exe** : il agit à la fois comme pré-processeur et post-processeur. Il offre une interface graphique permettant de définir la géométrie du problème, d'attribuer les propriétés des matériaux et de spécifier les conditions aux limites. Après la phase d'analyse, les résultats sont visualisables sous forme de cartes de densité de flux magnétique, de lignes de champ, etc. De plus, il est possible de calculer des intégrales ou d'afficher différentes grandeurs physiques le long de contours définis par l'utilisateur.

► **triangle.exe** : ce module est chargé de générer le maillage en subdivisant les régions du domaine en éléments triangulaires, une étape essentielle dans la méthode des éléments finis.

► **fkern.exe** : il s'agit du solveur principal, responsable de la résolution des équations aux dérivées partielles permettant d'obtenir les distributions du champ magnétique dans le domaine étudié.

Par ailleurs, le langage de script LUA est intégré aux environnements de pré- et post-traitement. Il permet l'automatisation complète des tâches : génération de géométrie, définition des paramètres, exécution des calculs, et traitement des résultats, sans intervention manuelle. Cette capacité de programmation rend possible la modélisation et la simulation d'un système non linéaire à l'aide de la méthode des éléments finis, via des scripts développés sous FEMM en langage LUA.

Les différentes étapes de mise en œuvre de cette simulation sont synthétisées dans l'organigramme présenté ci-après. [13]

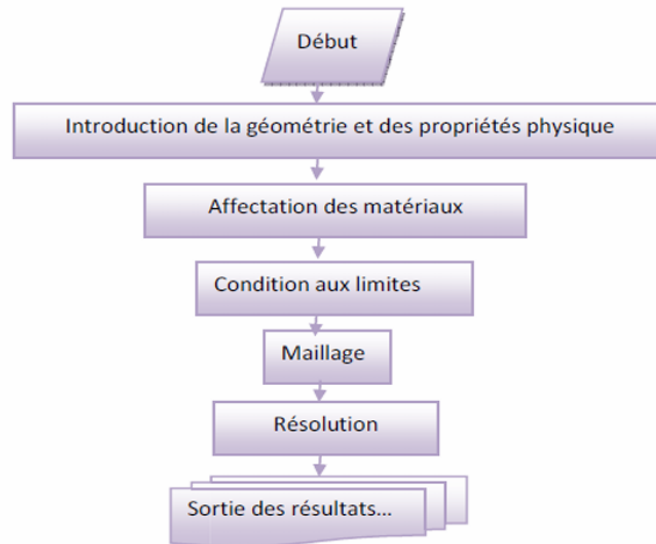


Figure II.2 :

Organigramme résumant les différentes étapes de calcul dans FEMM.

II.3.2.Paramètres de simulation :

a) Caractéristique $B(H)$ du matériau ferromagnétique utilisé (Figure II.3) :

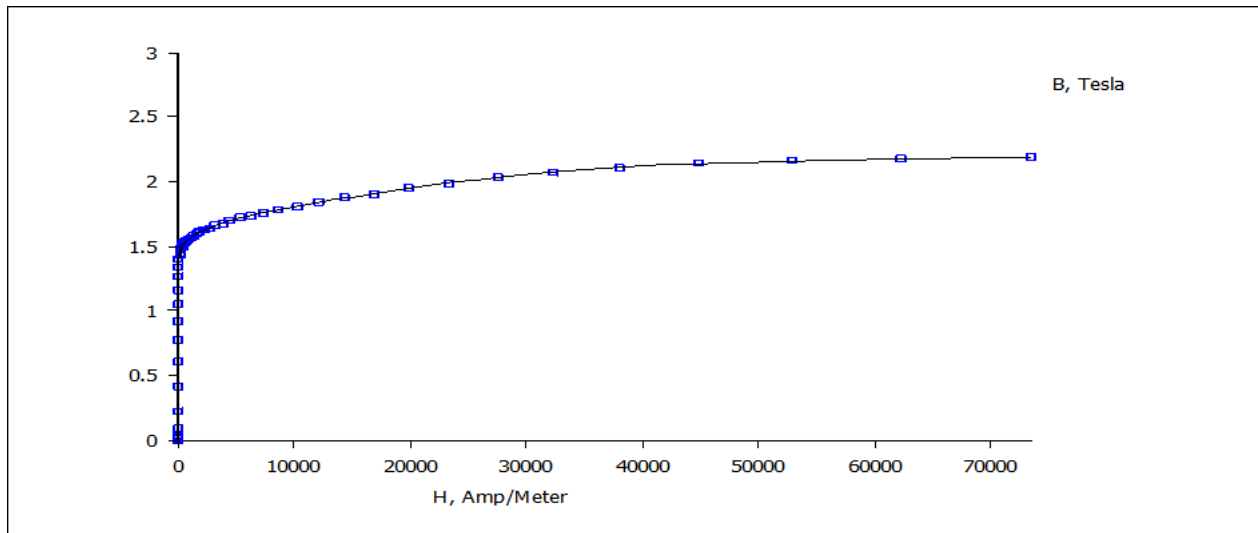


Figure II.3: Courbe $B(H)$ du matériau ferromagnétique utilisé.

b) L'alimentation : elle est considérée comme constante, de 0 A jusqu'à 10 A avec un pas de 2 A pour chaque simulation.

c) Le maillage : c'est « par défaut » du logiciel.

d) Les conditions aux limites : ce sont les conditions de Dirichlet (la limite extérieure de la machine).

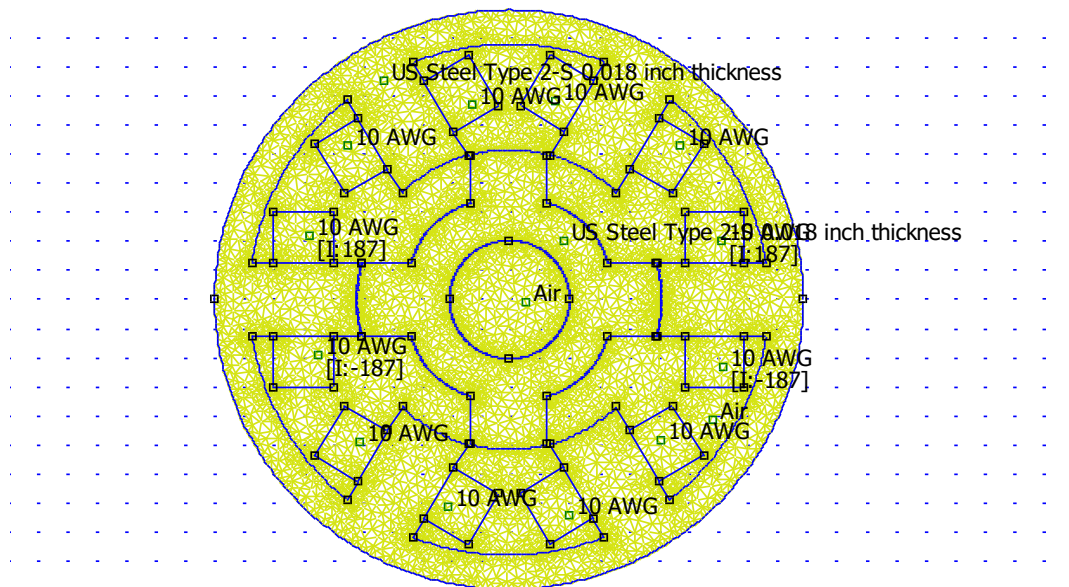
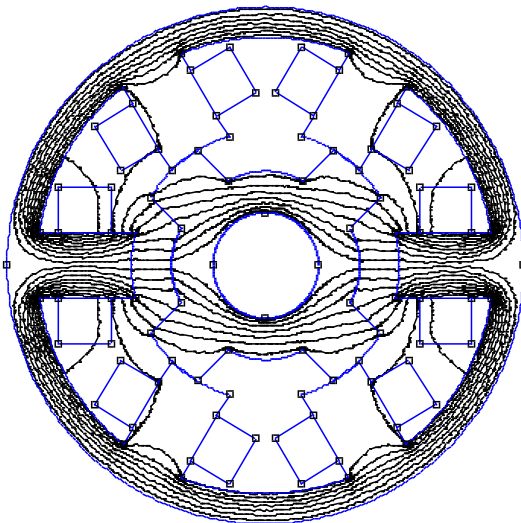


Figure II.4: Maillage de la MRVDS selon FEMM.

II.3.3. Mise en œuvre et exploitation des résultats :

a) **Lignes de champ et d'induction magnétiques** : pour une excitation de 10A pour les deux positions conjonction et opposition

• **Position d'opposition :**



• **Position de conjonction :**

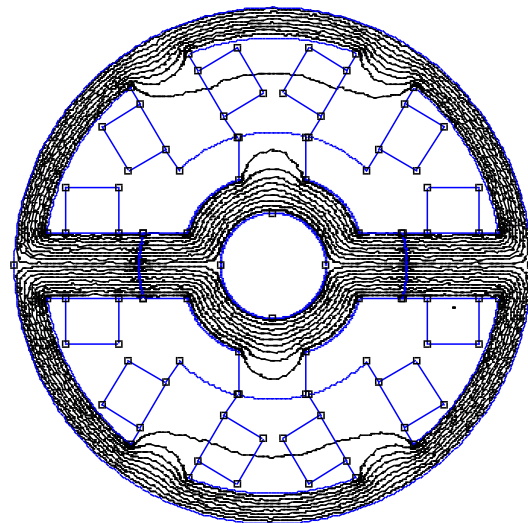


Figure II.5: Distribution des lignes de champ pour les deux positions extrêmes.

b) L'induction magnétique B ?

- Position de conjonction :

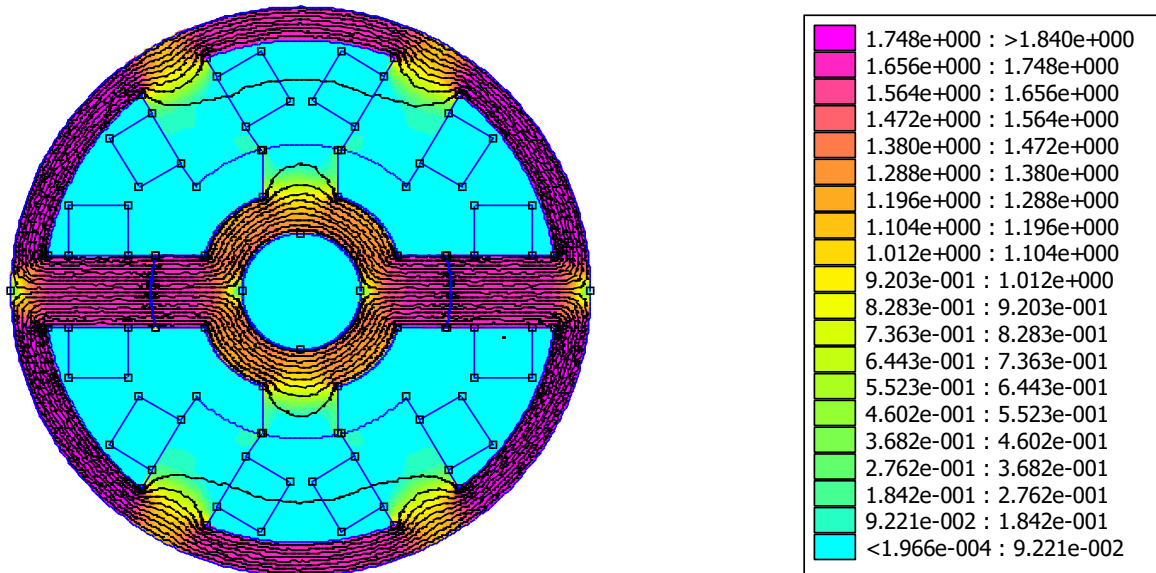


Figure II.6: Densité de champ magnétique en conjonction.

- Position d'opposition :

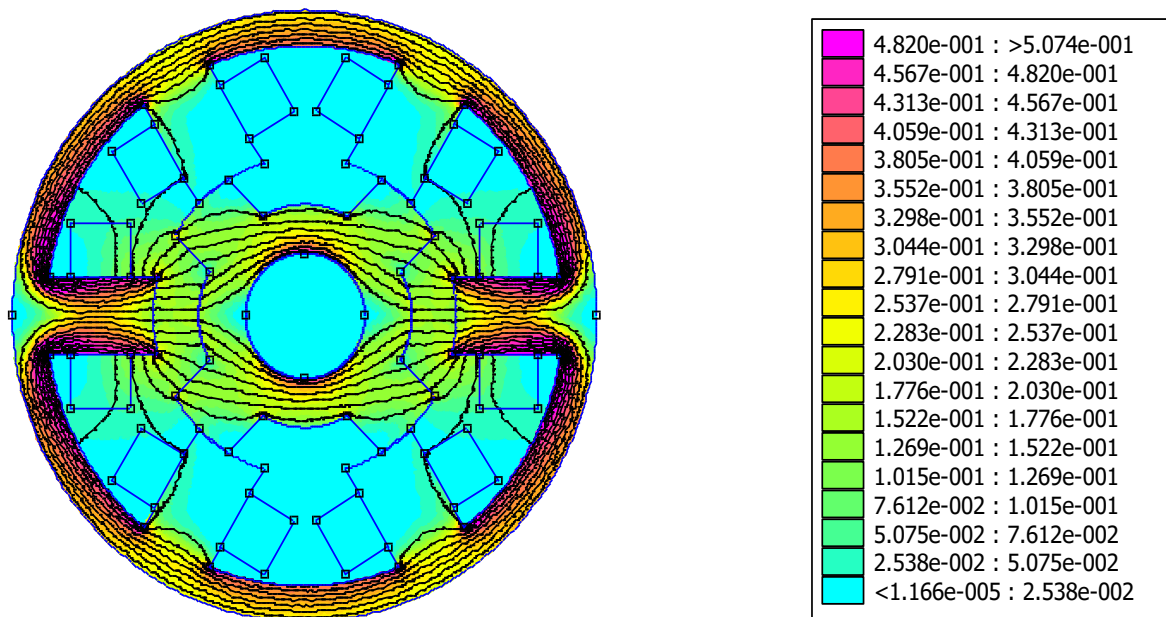


Figure II.7: Densité de champ magnétique en opposition.

c)Tableaux des résultats (couple & flux & Inductance totalisé) :

Tableau II.2 : Flux calculé par simulation sous FEMM :

Courant[A] Téta [°]	0	2	4	6	8	10
0	0	0.678442	0.73717	0.771936	0.799401	0.823138
5	0	0.665061	0.727643	0.763133	0.791141	0.815122
10	0	0.591142	0.690478	0.731218	0.759229	0.781704
15	0	0.458688	0.576801	0.632851	0.674491	0.706383
20	0	0.31903	0.416903	0.474234	0.525753	0.574039
25	0	0.177273	0.255183	0.313837	0.367944	0.419174
30	0	0.0558877	0.112524	0.168313	0.222608	0.275033
35	0	0.0413645	0.0833561	0.125377	0.167398	0.209384
40	0	0.0376179	0.0757719	0.11397	0.152173	0.19036
45	0	0.0366464	0.0738086	0.111011	0.148212	0.185422
50	0	0.0376138	0.075763	0.113952	0.152153	0.190338
55	0	0.0413677	0.0833542	0.125378	0.167415	0.209379
60	0	0.0559402	0.112635	0.168481	0.222804	0.275295
65	0	0.17728	0.255291	0.313922	0.368198	0.41944
70	0	0.319056	0.417042	0.474427	0.526122	0.574436
75	0	0.458676	0.576751	0.632919	0.674358	0.706305
80	0	0.591258	0.690594	0.731244	0.759269	0.781783
85	0	0.665067	0.727633	0.763107	0.791133	0.815111
90	0	0.678457	0.73716	0.771936	0.799394	0.823137

Tableau II.3 : Couple calculé par simulation sous FEMM :

Courant[A] Téta [°]	0	2	4	6	8	10
0	0	0.00305999	0.00273032	0.00244225	0.00414995	0.00357803
5	0	-1.06196	-1.60085	-2.04121	-2.45294	-2.83889
10	0	-1.73941	-3.65576	-4.93556	-6.20647	-7.60027
15	0	-1.88234	-5.26026	-8.76793	-11.7763	-14.1618
20	0	-1.89809	-5.43933	-9.13799	-12.7765	-16.3954
25	0	-1.77294	-5.33626	-8.98343	-12.5753	-16.1166
30	0	-0.427857	-1.72069	-3.74233	-6.25552	-9.03419
35	0	-0.069296	-0.282497	-0.639688	-1.14082	-1.78411
40	0	-0.0230319	-0.0938016	-0.212475	-0.378893	-0.593926
45	0	0.00018199	0.000725391	0.0017838	0.00254517	0.00458387
50	0	0.0230059	0.0937066	0.212429	0.379328	0.593254
55	0	0.0696708	0.284044	0.643741	1.14718	1.79463
60	0	0.426943	1.71868	3.73952	6.25005	9.03219
65	0	1.77761	5.35463	9.01573	12.6042	16.1414
70	0	1.89465	5.40728	9.10929	12.7605	16.3398
75	0	1.88111	5.2761	8.84153	11.8125	14.2389
80	0	1.72723	3.63175	4.89407	6.18799	7.51226
85	0	1.05275	1.5859	2.02536	2.43536	2.81817
90	0	0.00289504	0.00277661	0.00381134	0.00368512	0.00234115

Tableau II .4 : Inductance calculé par simulation sous FEEM :

Courant[A] Téta [°]	0	2	4	6	8	10
0	0	0.339221	0.184292	0.128656	0.0999251	0.0823138
5	0	0.332531	0.181911	0.127189	0.0988926	0.0815133
10	0	0.295571	0.17262	0.12187	0.0949037	0.0781681
15	0	0.229344	0.1442	0.105475	0.0843114	0.0706351
20	0	0.159515	0.104226	0.079039	0.0657191	0.0574088
25	0	0.0886367	0.0637958	0.0523062	0.045993	0.0419172
30	0	0.0279439	0.028131	0.0280522	0.027826	0.0275015
35	0	0.0206822	0.020839	0.0208962	0.0209247	0.019036
40	0	0.0188089	0.018943	0.018995	0.0190216	0.0185422
45	0	0.0183232	0.0184522	0.0185018	0.0185266	0.0190342
50	0	0.0188069	0.0189407	0.018992	0.0190192	0.0190338
55	0	0.0206839	0.0208386	0.0208964	0.0209268	0.0209379
60	0	0.0279701	0.0281587	0.0280801	0.0278504	0.0275295
65	0	0.0886399	0.0638227	0.0523204	0.0460247	0.041944
70	0	0.159528	0.104261	0.0790712	0.0657653	0.0574436
75	0	0.229338	0.144188	0.105487	0.0842947	0.0706305
80	0	0.295629	0.172649	0.121874	0.0949086	0.0781783
85	0	0.332533	0.181908	0.127184	0.0988917	0.0815111
90	0	0.339229	0.18429	0.128656	0.0999242	0.0823137

II.3.4..Tracé des différentes caractéristiques électromagnétiques :

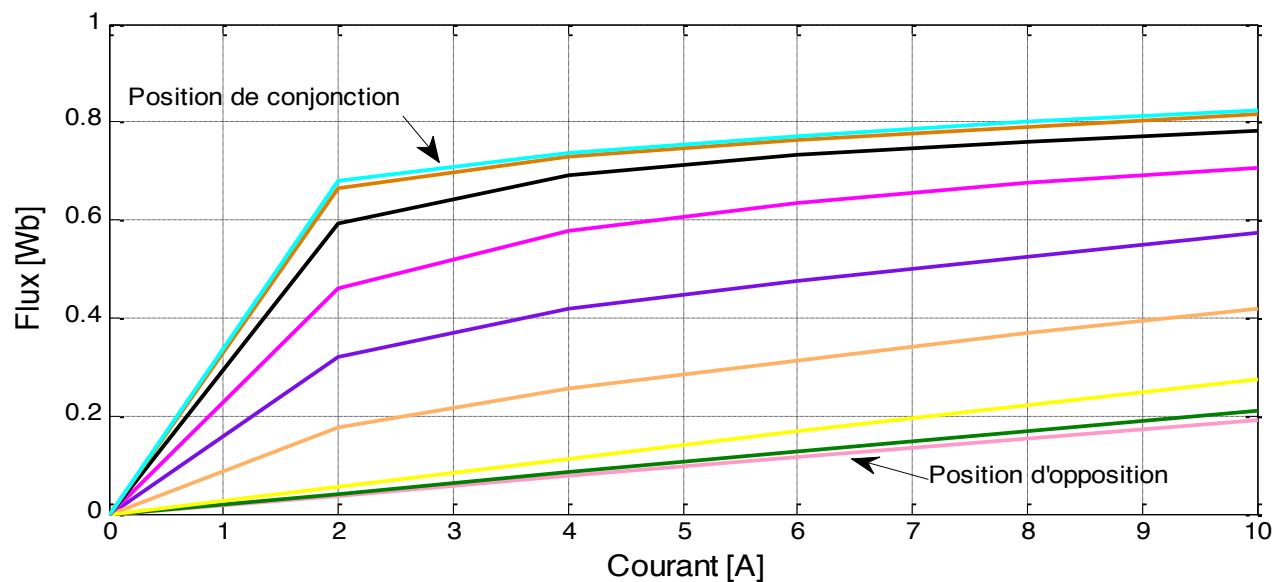


Figure II.8: Caractéristiques flux $\Psi(i)$ paramétrées avec la position.

Figure II.8: représente le flux magnétique en fonction de l'excitation(I) pour différentes valeurs de position du rotor (téta) avec un pas de 5°. On observe que la zone linéaire se situe entre 0 et 2A, qu'à 2A c'est la zone de coude de saturation et qu'à partir de 2A on entre dans la zone saturée.

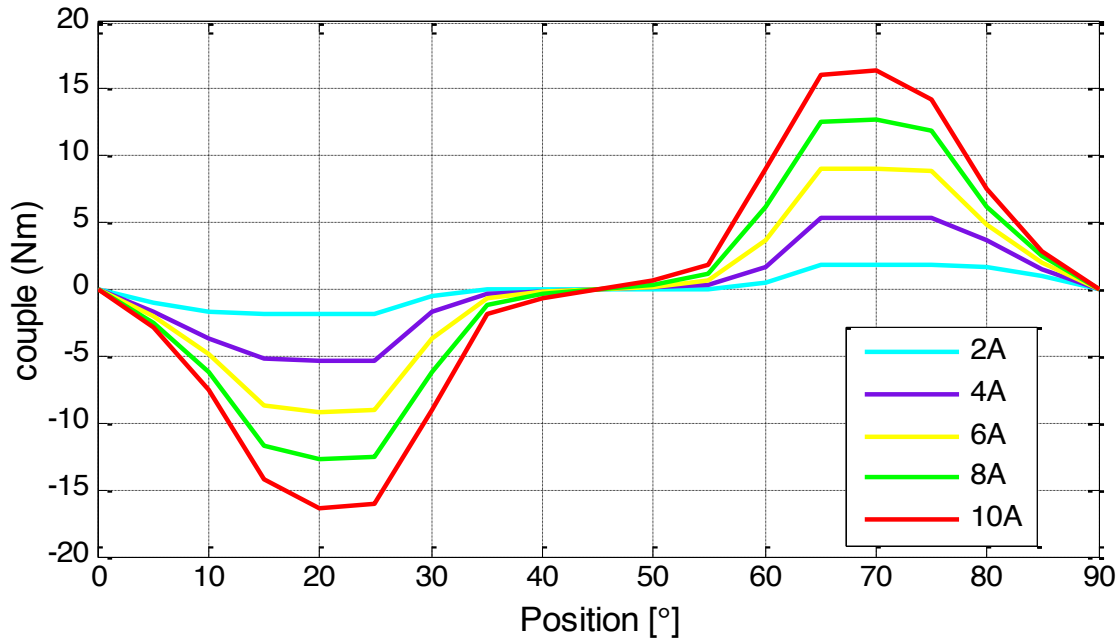


Figure II.9: Caractéristiques couple $C(\theta)$ paramétrées selon l'excitation

La (Figure II.9) ci-dessus représente le couple électromagnétique en fonction de la position du rotor à partir de la position de conjonction (0°) vers la position d'opposition (20°) puis vers l'autre position de conjonction (45°) ; on remarque que les maxima de toutes les courbes sont atteints pour une position voisine de (20°) (début du « face-à-face » des dentures).

- Remarques concernant le tracé du couple :

- le pas de rotation est de 5° pour avoir des courbes plus lisses
- le tracé du couple est modifié selon les étapes de processus de maillage : si le maillage appliqué est plus fin, le couple sera moins pointu.

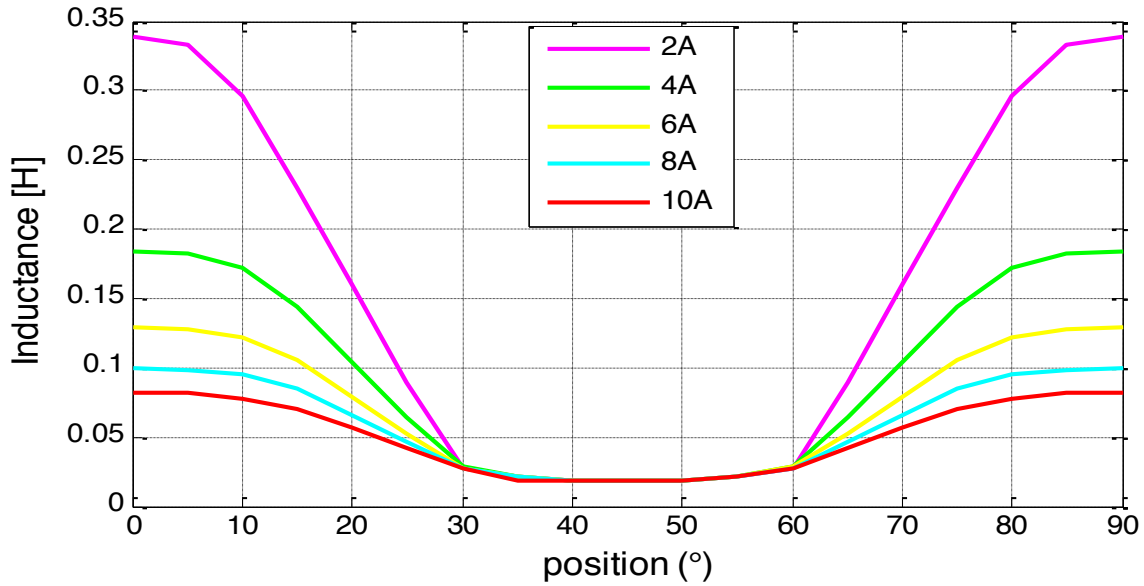


Figure II.10: Caractéristiques inductance $L(\Theta)$ paramétrées selon l'excitation.

La (Figure II.10) représente l'inductance d'une phase en fonction de la position du rotor, pour différentes valeurs d'excitations. L'inductance est minimale quand le rotor et le stator sont dans la position non alignée alors qu'elle atteint des valeurs maximales en position alignée, ce qui est logique ! De ce tracé, on déduit les valeurs d'inductances : $L_{\max}=0.34\text{H}$ et $L_{\min}=0.02\text{H}$.

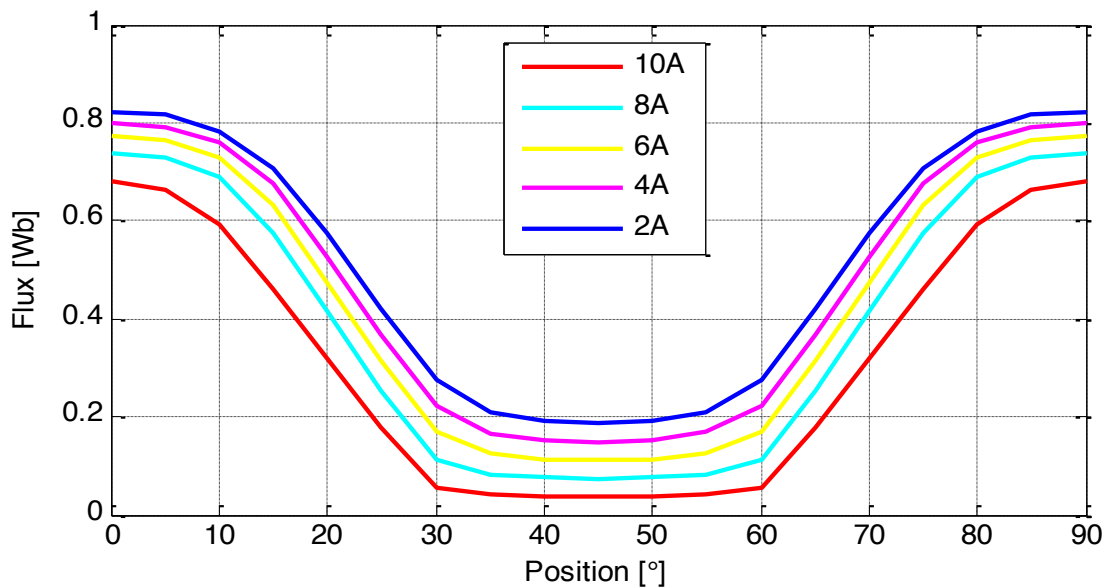


Figure II.11 : Caractéristiques flux $\Psi(\Theta)$ paramétrées selon l'excitation

La (Figure II.11) ci-dessus représente le flux magnétique en fonction de la position (Θ) pour différentes valeurs d'excitation (I) avec un pas de 2A.

II.4. Présentation de l'environnement MATLAB/Simulink:

Le logiciel MATLAB est largement utilisé dans les domaines du calcul scientifique, de la modélisation et de la simulation. Il est souvent couplé à l'environnement SIMULINK, qui permet la création de modèles à partir de représentations sous forme de schémas blocs. MATLAB dispose également de bibliothèques spécialisées, appelées Toolboxes, couvrant un large éventail de disciplines scientifiques telles que l'automatique, le traitement du signal, les mathématiques appliquées, ou encore les télécommunications.

Par ailleurs, des modules complémentaires développés par la société dSPACE, tels que Real-Time Interface (RTI), TRACE, et COCKPIT, sont disponibles afin d'enrichir l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ces outils permettent de passer aisément de la phase de simulation à celle de la mise en œuvre en temps réel, en facilitant notamment le prototypage, la supervision et le test de systèmes appliqués à des procédés physiques réels.

[14]

II.5. MODÈLE NON-LINÉAIRE DE LA MACHINE :

La non-linéarité de la caractéristique magnétique, exprimée par la relation $B = f(H)$, est désormais prise en compte dans notre modélisation. Pour simuler de manière précise le comportement d'une machine à réluctance variable, il est essentiel d'adopter une approche qui intègre cette non-linéarité tout en optimisant le temps de calcul.

Dans notre démarche sous MATLAB/SIMULINK, nous avons choisi de contourner l'utilisation directe des équations aux dérivées partielles, susceptibles d'engendrer des erreurs numériques. À la place, nous avons recours à deux tables de correspondance (look-up tables) permettant d'approximer les relations entre le flux, le courant et la position d'une part, et entre le couple, le courant et la position d'autre part, comme illustré aux Figures II.12 (a) et (b).

Dans le chapitre II précédent, la machine MRV 8/6 a été modélisée à l'aide de la méthode des éléments finis en régime magnétostatique, à l'aide du logiciel FEMM. Cette modélisation a permis d'extraire les données magnétiques nécessaires à la construction des look-up tables, représentées comme suit [14] :

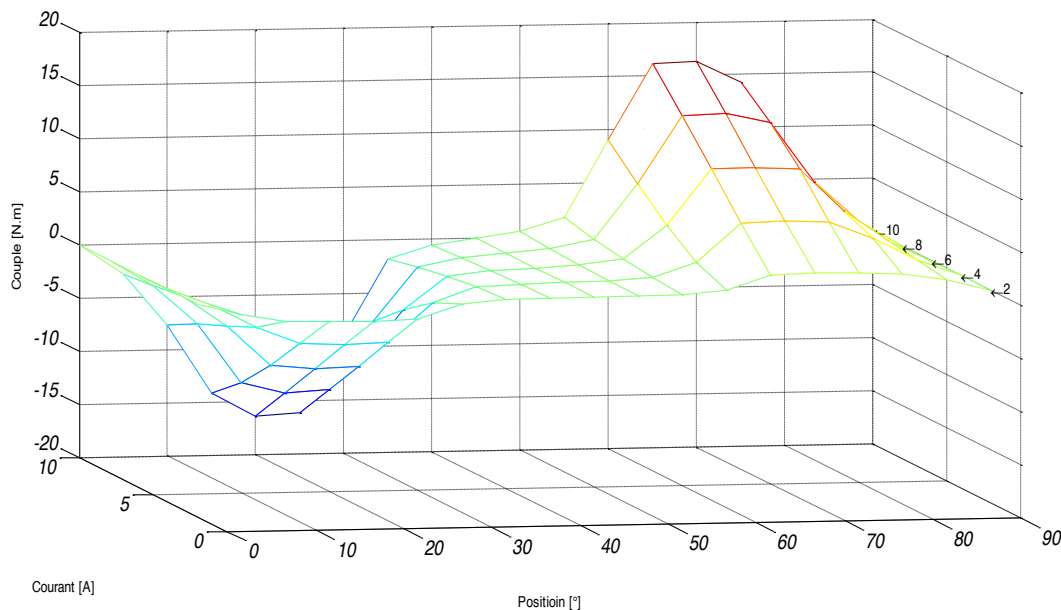


Figure II.12 a: Caractéristique couple/position/courant

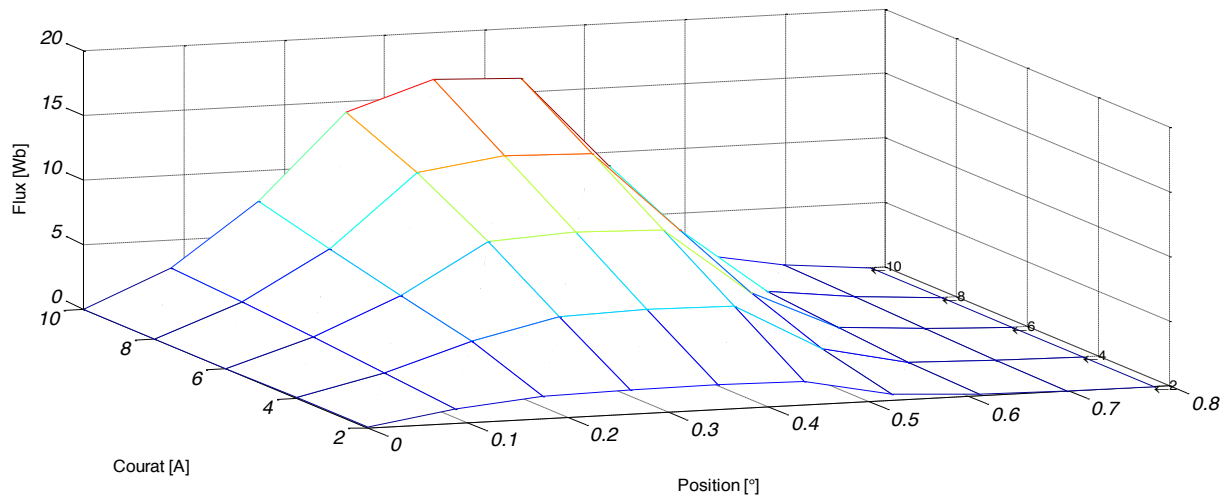


Figure II.12 b: Caractéristique flux/position/courant
Ces deux caractéristiques ont été plotées à l'aide des deux tableaux du Chapitre III.

II.6. Modèle non-linéaire de la MRVDS 6/4 sous MATLAB/SIMULINK

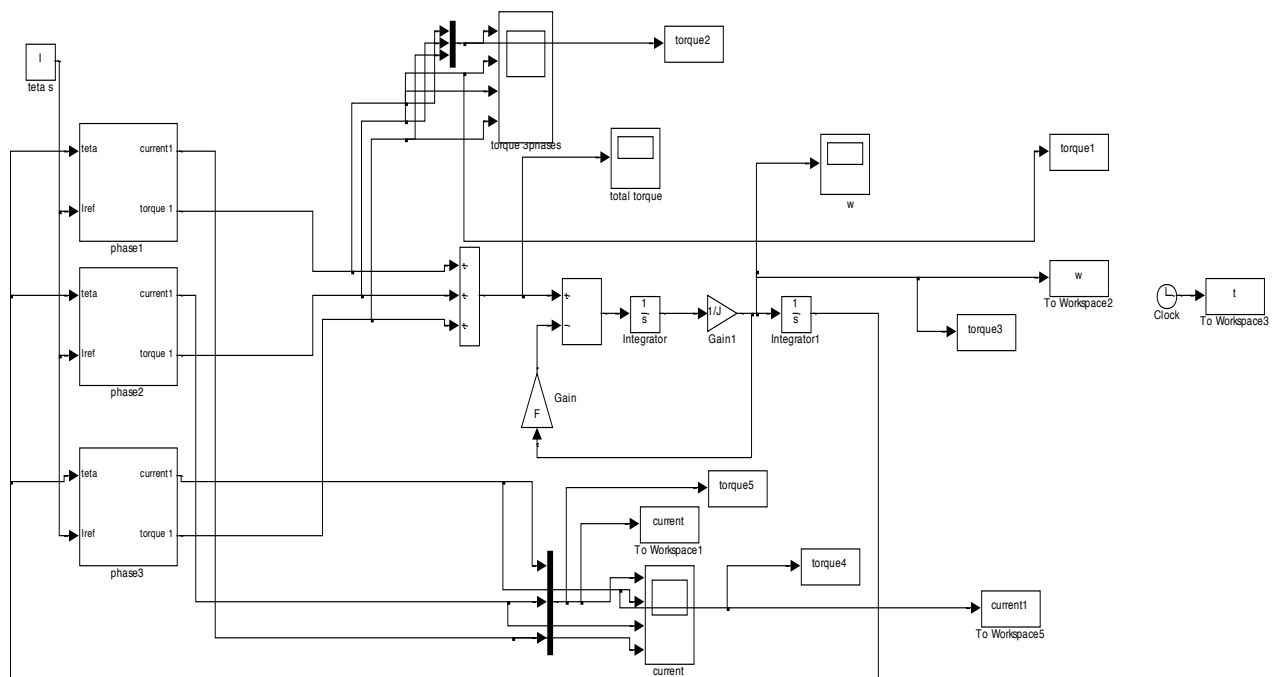


Figure II.13 : Schéma-bloc de simulation de la machine complète

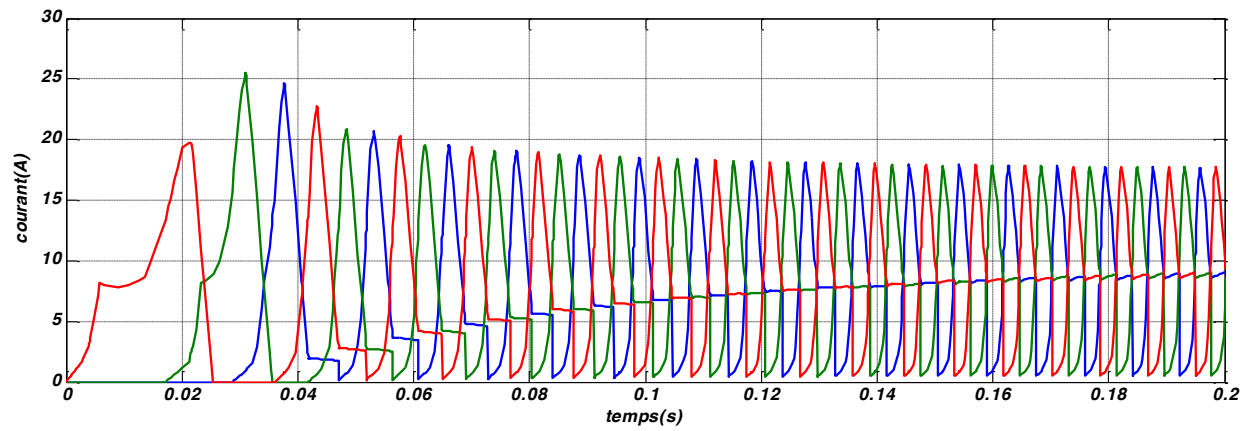


Figure II.17 : Courants des trois phases

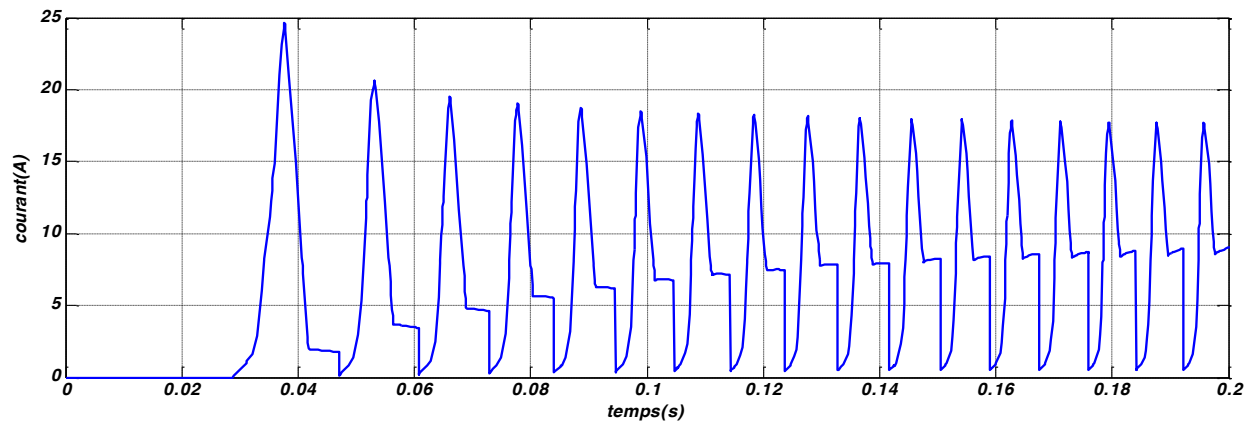


Figure II.18 : Courant de la phase (C).

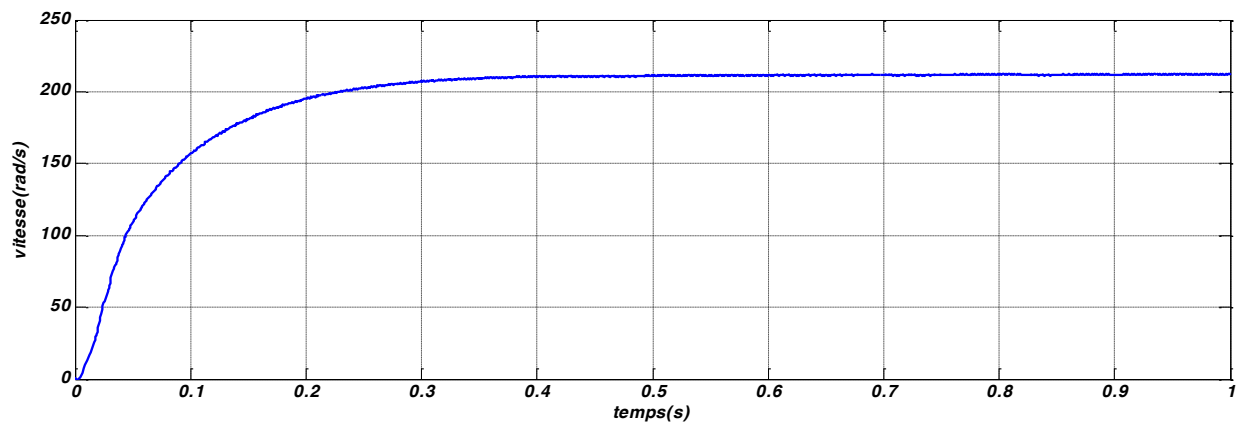


Figure II.19 : La vitesse de rotation en (rad/s)

II.8. Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons utilisé le logiciel FEMM avec MATLAB/Simulink pour modéliser le moteur en utilisant la méthode des éléments finis, quand il fonctionne comme un moteur. Nous avons fait la simulation du moteur dans cet environnement, puis obtenu des caractéristiques électromagnétiques (sous forme de tables 3D), qui ont été utilisées ensuite pour simuler le comportement dynamique du moteur dans Simulink.

Dans le troisième chapitre, nous allons optimiser les angles du MRV afin de réduire les ondulations du couple électromagnétique en utilisant l'algorithme génétique et l'algorithme PSO

CHAPITRE III:
Optimisation des angles
de MRV

III.1. Introduction :

L'ondulation du couple représente un problème fondamental dans les moteurs à RV, limitant leur performance optimale. Plusieurs stratégies de contrôle et de conception ont été proposées pour améliorer les performances des MRV, notamment en réduisant les ondulations de couple et en optimisant la réponse de la vitesse. Le choix des paramètres de contrôle joue un rôle crucial dans la qualité des résultats. Si les méthodes analytiques et la sélection manuelle donnent des résultats acceptables, elles restent limitées. Les algorithmes intelligents apparaissent alors comme une solution plus efficace pour résoudre les problèmes d'optimisation, largement utilisés aujourd'hui dans les domaines du fonctionnement, de la planification et du contrôle des systèmes d'alimentation électrique [15-16].

III.2. Optimisation par essaim particulaire PSO :

L'optimisation par essaims particulaires (Particle Swarm Optimization – PSO) est l'un des algorithmes fondés sur l'intelligence collective. Elle a été développée en 1995 par l'ingénieur électricien Russel Eberhart et le socio-psychologue James Kennedy . Cet algorithme s'inspire initialement du comportement des êtres vivants, et repose notamment sur un modèle proposé par le biologiste Craig Reynolds à la fin des années 1980 pour simuler les déplacements en groupe des oiseaux[6].

III.3. Base de la technique PSO :

Cet algorithme explore l'espace de recherche afin de trouver la fonction objective en ajustant la trajectoire d'un individu appelé particule. La particule est attirée vers la meilleure position globale tout en se déplaçant de manière partiellement aléatoire. Lorsqu'une particule découvre une position meilleure que celles qu'elle a déjà rencontrées, elle la mémorise comme sa meilleure position personnelle. Ainsi, la meilleure position globale est déterminée parmi toutes les meilleures positions individuelles des particules. Le processus se poursuit jusqu'à ce que le critère d'optimisation soit satisfait ou qu'un nombre maximal d'itérations soit atteint[17]

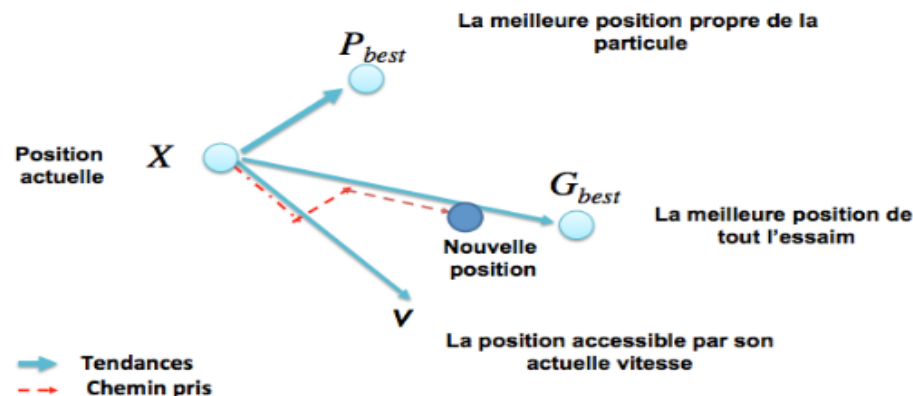


Figure III.1: Mécanisme de déplacement d'une particule [21]

III.4. Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO :

Afin d'exploiter le comportement intelligent des animaux, il est nécessaire de traduire les mouvements sociaux en équations mathématiques. Dans un espace de recherche de dimension D, la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position X et par son vecteur vitesse V la position initiale de chaque particule définie aléatoirement dans les limites de domaine de recherche du problème. Et puis, le déplacement de chaque particule est déterminé par le vecteur vitesse pour chaque itération. Le vecteur vitesse est calculé à partir de l'équation [6] :

$$v_{i,j}^{t+1} = wv_{i,j}^t + c_1 r_{1,i,j}^t (Pbest_{i,j} - x_{i,j}^t) + c_2 r_{2,i,j}^t (Gbest_j^t - x_{i,j}^t)$$

Ensuite, la nouvelle position dans l'itération t peut être trouvée par équation :

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1}$$

N est le nombre de particules, r1 et r2 sont deux nombres aléatoires pour chaque itération t et pour chaque dimension j déterminent dans l'intervalle [0-1]., t est le nombre d'itérations, **pbest** est la meilleure solution trouvée par une particule individuellement. **gbest** est la meilleure solution trouvée parmi toutes les particules de l'essaim. w est lamasse d'inertie Il commence par une valeur proche de 0,9 et descend linéairement pour arriver à 0,4. c1 et c2 sont deux constantes appelées coefficients d'accélération.

.. c1 est la constante d'accélération cognitive ; cette composante propulse la particule vers la position où elle avait la meilleure fonction objective.

....c2 est la constante d'accélération sociale ; elle dirige la particule vers la particule qui a actuellement la meilleure position globale[18].

III.5.Organigramme de l'algorithme PSO :

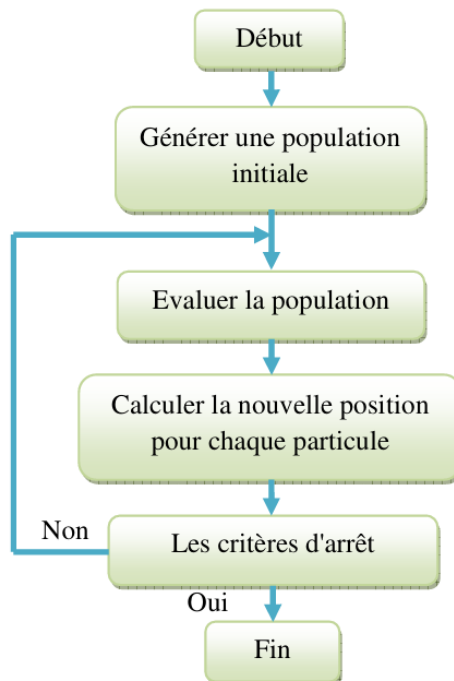


Figure III.2: Organigramme de base de la méthode PSO

L'organigramme de la Figure III.2 présente les étapes principales de la méthode PSO. D'abord, une population initiale est créée de manière aléatoire dans les limites de l'espace de recherche. Ensuite, chaque particule est évaluée selon la valeur de la fonction objectif. Puis, la position de chaque particule est mise à jour à l'aide des équations X et V, enfin l'algorithme s'arrête selon certains critères, comme une erreur acceptable " ϵ " ou un nombre maximal d'itérations[12].

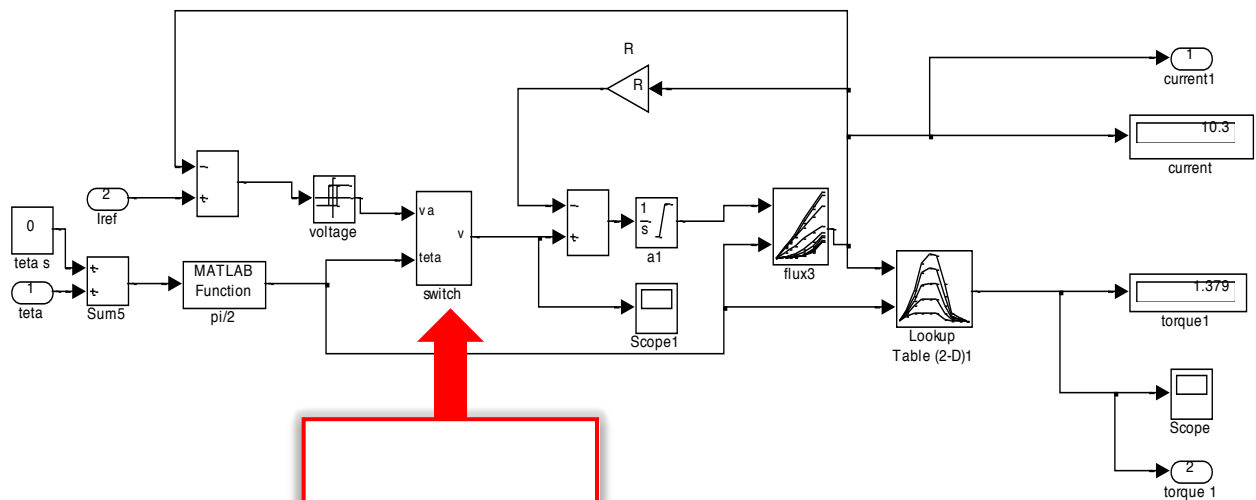


Figure III.3 :Schéma synoptique de l'algorithme PSO appliqué

Donc notre idée était de trouver un lien entre MATLAB*.m/ fichier et MATLAB/Simulink, donc appeler le modèle Simulink, faire des simulations pour des angles donnés, puis récupérer les résultats et faire une comparaison entre eux pour trouver les meilleurs angles θ_{on} et θ_{off} . On a laissé les paramètres de simulation par défaut de l'algorithme PSO Selon la littérature, l'ondulation du couple (en anglais torque ripple) est définie par l'équation:

$$K_T = \frac{T_{e \max} - T_{e \min}}{T_{avg}}$$

- $T_{e \max}$: le maximum du couple généré
- $T_{e \min}$: le minimum du couple généré
- T_{avg} : le couple moyen

Rq : on peut étudier cette fonction avec seulement les deux facteurs du numérateur parce que le couple moyen reste constant pour toutes les simulations [13].

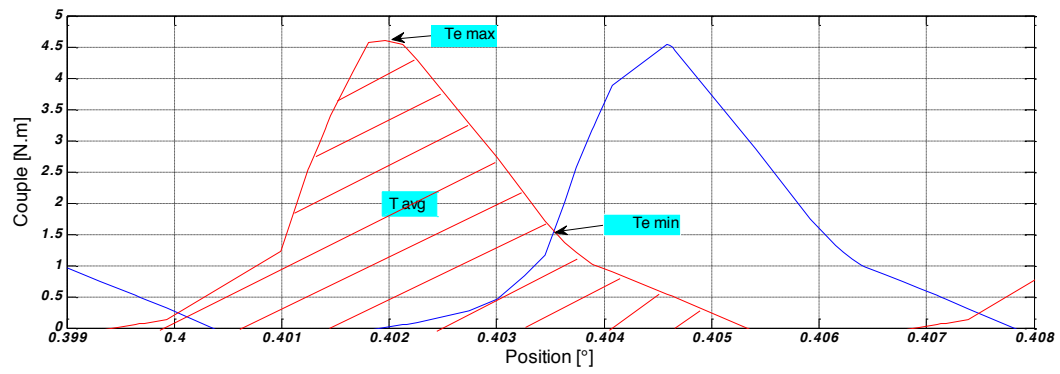


Figure III.4 : Couple maximum, couple minimum et couple moyen

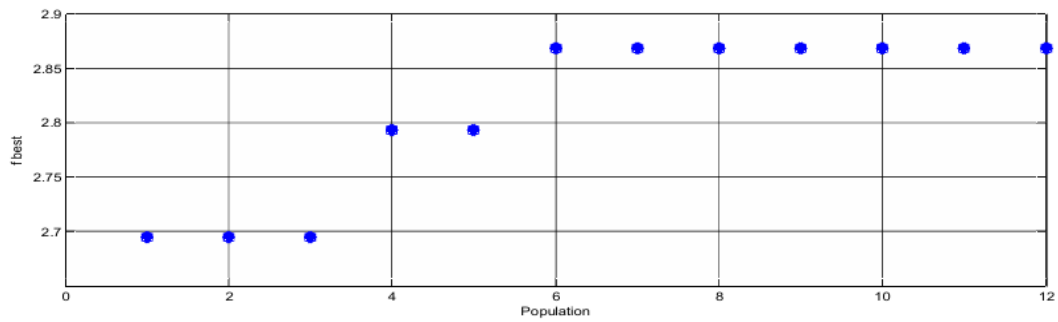


Figure III.5 : Résultat de calcul utilisant PSO

$[\theta_{on\ min} \ \theta_{on\ max}]$	$[\theta_{off\ min} \ \theta_{off\ max}]$	$[\theta_{on\ best} \ \theta_{off\ best}]$	Tripple /Tavg
[20 25]	[25 35]	[23.7204 33.4099]	2.8685/Tavg

Tab III.1 : Résultat de calcul utilisant PSO

III.6. Optimisation par l'algorithme génétique (GA) :

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes d'optimisation stochastiques, issues de la famille des algorithmes évolutionnaires. Ils s'inspirent des principes de la sélection naturelle tels que formulés par Charles Darwin dans *"The Origin of Species"*, où l'évolution repose sur deux mécanismes fondamentaux : la sélection des individus les plus aptes et la reproduction avec variation génétique.

C'est John Holland qui, en 1975, a proposé le premier modèle formel d'algorithme génétique dans son ouvrage *"Adaptation in Natural and Artificial Systems"*. Il y introduit les notions de croisement (échange de matériel génétique entre individus) et de mutation (source de diversité), posant ainsi les bases d'une approche innovante pour intégrer de l'intelligence dans les systèmes informatiques. Ces travaux ont été largement repris et vulgarisés par David E. Goldberg dans son livre de référence *"Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning"* (1989), devenu un ouvrage incontournable dans ce domaine.

Aujourd'hui, les algorithmes génétiques suscitent un intérêt croissant en raison de leur souplesse et de leur capacité à résoudre des problèmes complexes définis sur des espaces de recherche non réguliers ou discrets. Leurs domaines d'application sont vastes : optimisation numérique, traitement d'images, planification, contrôle de systèmes industriels, cryptographie, apprentissage automatique, finance, et même théorie des jeux[19].

III.7. Base de la technique AG:

Les algorithmes génétiques (AG) sont utilisés pour résoudre des problèmes complexes dont les solutions ne peuvent être calculées efficacement par des méthodes classiques. Inspirés du processus de l'évolution naturelle, les AG favorisent les individus les plus performants, qui ont plus de chances de transmettre leurs gènes à la génération suivante.

À chaque itération, une nouvelle population est formée par combinaison (croisement) et modification (mutation) des gènes des meilleurs individus. Le processus se répète jusqu'à convergence vers une population homogène, représentant généralement une solution optimale ou proche de l'optimum au problème posé.

L'AG fonctionne donc par sélection, croisement, mutation et évaluation, dans un cycle évolutif itératif visant à améliorer progressivement les solutions. Chaque itération se compose des étapes suivantes

1. **Initialisation** : Une population initiale P_i de N chromosomes est tirée aléatoirement.
2. **Évaluation** : Chaque chromosome est décodé à la valeur réelle puis évalué.
3. **Sélection** : Cette étape consiste à sélectionner les meilleurs chromosomes pour la reproduction. Cette sélection se fait au hasard avec une probabilité selon l'état des chromosomes, de sorte que les meilleurs sont souvent choisis pour la reproduction que les plus pauvres.
4. **Croisement** : Dans cette étape, les descendants (les nouveaux chromosomes) sont élevés par deux-à-deux des chromosomes sélectionnés.

5. **Mutation:** Il s'agit ici de modifier sur un chromosome pour chaque génération, afin d'obtenir un nouveau chromosome optimisé avec des caractéristiques différentes.

6. **Répéter:** Retour à la phase d'évaluation tant que le critère d'arrêt n'est pas satisfait. [12-20]

III.8. Organigramme de l'algorithme AG :

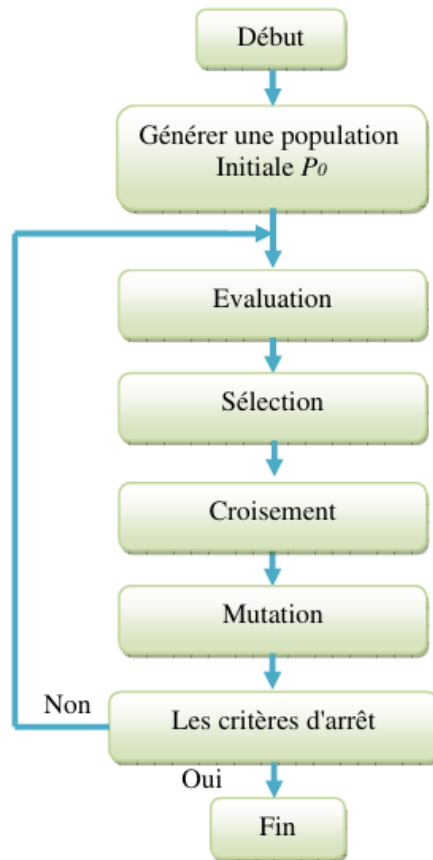
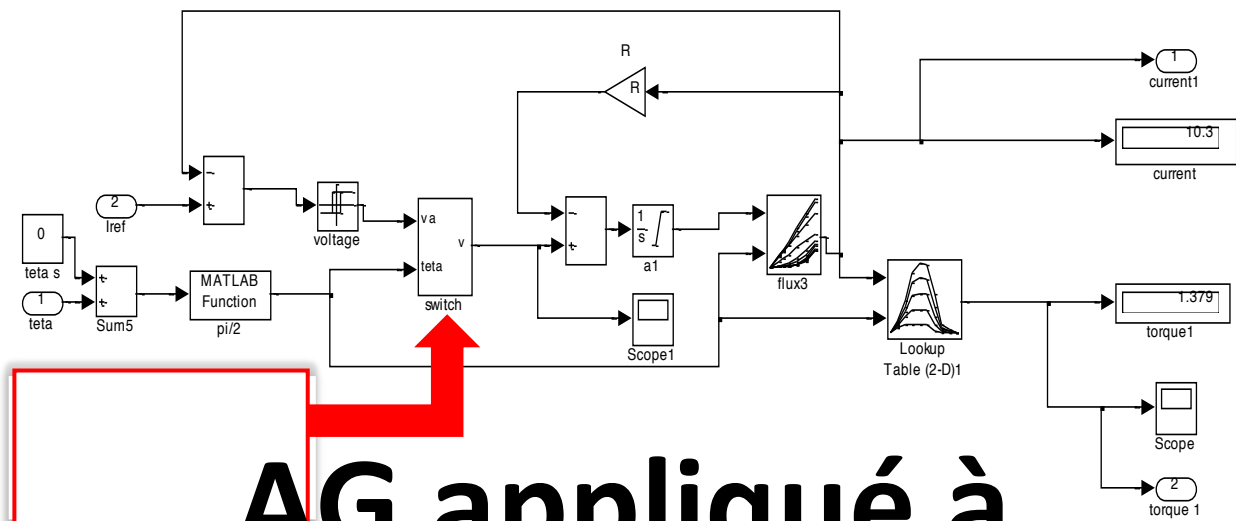


Figure III.6: Organigramme de base de l'algorithme génétique



AG appliqué à

Figure III.7 :Schema synoptique de l'GA appliqué

partir de l'outil

Problem Setup and Results

Solver: **ga - Genetic Algorithm**

Problem

Fitness function: **@OPTIM_MRV64TORQUERIPPLE**

Number of variables: **2**

Constraints:

Linear inequalities: A: b:

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: **[20 30]** Upper: **[25 35]**

Nonlinear constraint function:

Run solver and view results

☐ Use random states from previous run

Start Pause Stop

Current iteration: **10** Clear Results

Optimization running.
Warning: Output port 1 of 'non_linear/phase3/torque5' is not connected.
Optimization terminated.

Final point:

1	2
23,235	34,681

Options

Population

Population type: Double Vector

Population size: ☐ Use default: 20 ☒ Specify: **10**

Creation function: Use constraint dependent default

Initial population: ☒ Use default: [] ☐ Specify:

Initial scores: ☒ Use default: [] ☐ Specify:

Initial range: ☒ Use default: [0;1] ☐ Specify:

Fitness scaling

Scaling function: Rank

Selection

Selection function: Stochastic uniform

Figure III.8 :Capture écran de l’algorithme appliqué

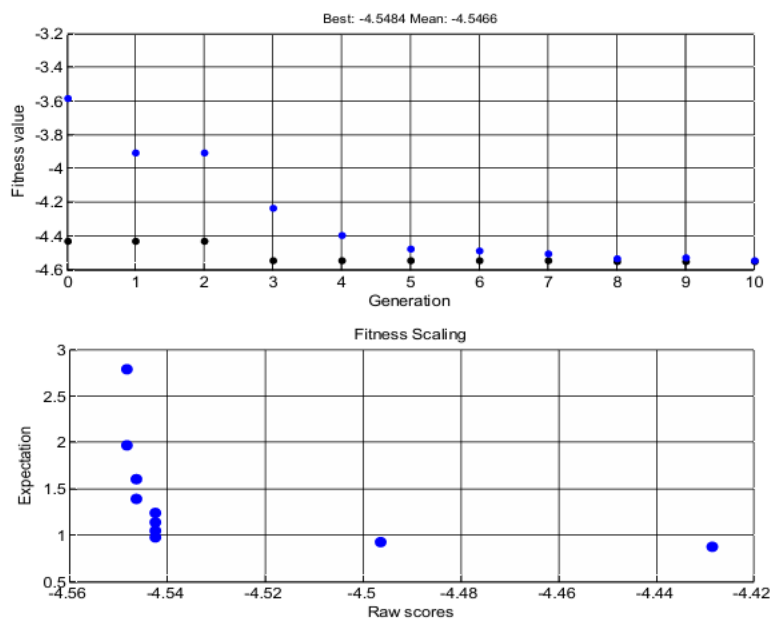


Figure III.9 : Résultats de calcul utilisant GA

[θ_{on} min θ_{on} max]	[θ_{off} min θ_{off} max]	[θ_{on} best θ_{off} best]	Tripple /Tavg
[20 30]	[25 35]	[23.235 34.6]	4.548/Tavg

Tab III.2 : Résultat de calcul utilisant GA

Après avoir utilisé les algorithmes PSO et GA pour optimiser les angles d'amorçage (θ_{on}) et d'extinction (θ_{off}) dans un moteur à réluctance variable, dans le but de réduire les ondulations du couple électromagnétique, les résultats ont montré que les deux méthodes ont donné de bonnes performances, avec des solutions proches en termes de valeurs optimales. Cela reflète l'efficacité des algorithmes utilisés. Il a été constaté que l'algorithme PSO présente une vitesse de convergence plus élevée, tandis que l'algorithme GA montre une meilleure capacité à explorer l'espace des solutions et à éviter les minima locaux. Ces résultats suggèrent la possibilité de développer des algorithmes hybrides combinant les avantages des deux approches afin d'améliorer les performances globales.

II.9. Conclusion :

Dans ce troisième chapitre, les angles d'amorçage (θ_{on}) et d'extinction (θ_{off}) ont été optimisés à l'aide des algorithmes PSO et GA appliqués au modèle non linéaire du moteur à réluctance variable 6/4, afin de maximiser le couple moyen et de minimiser les ondulations du couple électromagnétique. Cette démarche d'optimisation a conduit à des valeurs angulaires quasi identiques, avec ($\theta_{on} \approx 23^\circ$; $\theta_{off} \approx 34^\circ$).

Conclusion générale :

Les machines à réluctance variable (MRV) sont connues depuis plus d'un siècle, mais elles ont connu un développement important ces dernières années, ce qui a attiré une attention croissante dans le domaine des machines électriques. Cela s'explique par leur conception simple, leur robustesse et leurs bonnes caractéristiques électromagnétiques, qui les rendent adaptées aux applications nécessitant un couple élevé et un contrôle précis. C'est pourquoi elles sont aujourd'hui largement utilisées dans plusieurs domaines industriels, et peuvent représenter une alternative efficace aux moteurs classiques.

Dans ce travail, nous avons étudié ce type de moteur, concentrant particulièrement sur le problème des ondulations du couple électromagnétique, qui affectent directement les performances du moteur, notamment en termes de bruit, de vibrations et les pertes énergétiques. Pour y remédier, notre travail s'est appuyé à la fois sur une analyse théorique précise, accompagnée de simulations numériques à l'aide de logiciels spécialisés.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation des caractéristiques magnétiques des moteurs MRV. Le deuxième chapitre s'est orienté vers la modélisation et la simulation d'un moteur MRV 6/4 à double saillance, d'abord dans l'environnement FEMM, puis sous MATLAB/SIMULINK en mode moteur. Enfin, dans le troisième chapitre, qui représente la partie principale de notre travail, nous avons optimisé les angles de commande (θ_{on} et θ_{off}) en utilisant les algorithmes PSO et GA.

Les résultats obtenus montrent que l'optimisation de ces angles permet de réduire efficacement les ondulations du couple, d'augmenter le rendement du moteur et de prolonger sa durée de vie. Cela démontre l'importance cruciale de l'intégration entre une modélisation précise et des techniques de contrôle intelligentes pour la conception de systèmes d'entraînement électrique à haute performance.

En conclusion, ce travail ouvre la voie à de futures perspectives, notamment l'intégration de l'intelligence artificielle et des techniques d'optimisation adaptative, afin d'atteindre des performances optimales en temps réel, en particulier dans les systèmes complexes et dynamiques. Cette recherche constitue ainsi une base solide pour le développement de solutions plus avancées dans le domaine de la conversion électromécanique de l'énergie.

Référence bibliographique :

- [1] B. Multon, "Principe et éléments de dimensionnement des machines à reluctance variable à double saillance autopilotées ", Proc. Journées électrotechniques club EEA, 1993.
- [2] B. Multon, "Historique des machines électromagnétique et plus particulièrement des machines a reluctance variable", Revue 3E.I n°3, pp.3-8, juin 1995.
- [3] Kada Belghitri Naouel 'Contribution à la modélisation par la méthode des réseaux de reluctances (MRR) d'une machine a reluctance variable ', Thèse de Doctorat, université d'Oran (USTO),2014/2015
- [4] Dimensionnement et Étude MagnétoThermique d'une Machine à Réluctance Variable (MRV 12/8)" Walid Zeboudj, Saadeddine Zekraoui, mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2019
- [5] MOUELLEF Sihem, "Contribution à l'étude d'une machine à reluctance variable : conception, modélisation et simulation d'une MRVDS 6-4", Mémoire de Magister, Université MENTOURI de Constantine, Département d'Electrotechnique, soutenu le 03/06/2008.
- [6] LABIOD Chouaib, "Contribution à la modélisation dynamique à base d'éléments finis, au contrôle et à l'optimisation des machines à reluctance variable", Thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider - Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Électrique, soutenue le 26/06/2018.
- [7] Y. Liao, T.A. Lipo, « A New Doubly-Salient Permanent Magnet Motor For Adjustable Speed Drives», SPEEDAM Conf. (Positano, Italy), May 19-21, 1992, pp. 415-420.
- [8] Y. Liao, F. Liang, T.A. Lipo, « A Novel Permanent Magnet Motor with Doubly Salient Structure», IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 31, NO.5, September/October 1995.
- [9] ALIOUAT Laetia, "Modélisation Analytique d'une Machine à Réluctance Variable (MRV)", Mémoire de Master en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Département d'Électrotechnique, Laboratoire de Recherche en Électrotechnique, soutenu le 20/06/2016.
- [10] "Contribution à la modélisation par la méthode des réseaux de reluctances (MRR) d'une machine à reluctance variable" Kada Belghitri Naouel, thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015
- [11] Dimensionnement et Étude MagnétoThermique d'une Machine à Réluctance Variable (MRV 12/8)" Walid Zeboudj, Saadeddine Zekraoui, mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2019
- [12] LABIOD Chouaib, "Contribution à la modélisation dynamique à base d'éléments finis, au contrôle et à l'optimisation des machines à reluctance variable", Thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider - Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Électrique, soutenue le 26/06/2018.
- [13] Benamimour Tariq, "Dimensionnement,Modélisation et Optimisation de Machines à Réluctance Variable : Applications en Moteur /Générateur", ,02/07/2018 ,Pages 24/25.
- [14] Benamimour Tariq , " Modélisation et simulation dynamique d'une machine à reluctance variable sous Matlab/ Simulink" , Mémoire de master, Juin 2012 .
- [15]: J, Robinson, and Y,Rahmat-Sami, "Particle swarm optimization in electromagnetics", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52 (2004), pp. 397-407.
- [16] X,S, Yang, "Introduction to Mathematical Optimization From Linear Programming to Metaheuristics", Cambridge International Science Publishing 2008.
- [17] BALAJI, M. et KAMARAJ, V., *Design Optimization of Switched Reluctance Machine using Particle Swarm Optimization*, SSN College of Engineering, Département de génie électrique et électronique, Kalavakkam, District de Kanchipuram, Inde

-
- [18]GAO, Jie ; SUN, Hexu ; HE, Lin ; DONG, Yan ; ZHENG, Yi. *Optimization Design of Switched Reluctance Motor based on Particle Swarm Optimization*. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Chine.
- [19] MÉHIDID, Fadila. (2013). Algorithme Génétique. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Mathématiques, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Faculté des Sciences Exactes et Informatique, Département de Mathématiques, Algérie
- [20] HAMIMID, M. *Application des algorithmes génétiques à l'optimisation de la conception des machines asynchrones*. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie Electrotechnique, option Commande Électrique. Université Mohamed Boudiaf de Msila, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Département d'Électrotechnique, 2008.
- [21] Zemzami, M., Elhami, N., Makhoufi, A., & Hmina, N. (2017). Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité. *Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques*, 17(1).