



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

Mémoire MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : électrotechnique

Spécialité : électrotechnique Industrielle



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

Présenté par :

BENSALEM Nour El Houda

Thème :

**Commande par logique floue d'une
machine à réluctance variable appliquée à
la traction de véhicule électrique.**

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

M^r KHELIFA Moussa

MCB

Président

UKM Ouargla

M^r TAIBI Djamel

MAA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r BOUREK Yacine

Professeur

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire :2024/2025

REMERCIEMENT

Toute la gratitude et le merci au bon dieu qui ma donne la force pour effectuer et achever ce travail.

Au terme de ce travail, je voudrai insérer mes sincères remerciements à mon encadreur monsieur TAIBI Djamel, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses précieux conseils pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité, Grâce à ses orientations pertinentes, et ses orientations judicieuses, sa patience et diligence, et par ses suggestions à grandement facilité ce travail.

Enfin j'adresse mes vifs remerciements aux membres de jury, qui me font l'honneur d'évaluer ce travail et dont l'expertise représente pour moi une reconnaissance précieuse.

DEDICACE

*J'ai l'honneur de dédier ce travail réalisé grâce à
l'aide de Dieu.*

*Je dédie ce travail à ma chère mère et mon cher père, dont
l'amour inconditionnel a été une source inestimable de
soutien et de guidance tout au long de mon parcours. Leur
présence bienveillante, leurs sacrifices constants et leur
encouragement indéfectible ont nourri ma détermination et
renforcé ma motivation.*

A mes amis et mes proches

A mes collègues CATERPILLAR BMA sud

ABSTRACT:

The field of electric traction has garnered increasing interest in recent years. In order for electric vehicles to replace those equipped with internal combustion engines, a significant improvement in electromagnetic and energy performance is required the choice of the electronically switched reluctance motor (SRM) as a lightweight electric traction solution is justified by its simple construction, high reliability, low manufacturing cost, and reduced weight. However, controlling this type of machine presents certain challenges, notably torque ripple and acoustic noise, which are among its main drawbacks. In this study, the design of an SRM was conducted while ensuring compliance with the energy performance and electromagnetic characteristics of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) used in the Toyota Prius 2010. To achieve optimal control, a fuzzy speed controller is applied to the motor, combine with a specific technique to reduce torque ripple.

Keywords: switched reluctance motor (SRM), Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Torque ripple, fuzzy logic control (FLC).

RÉSUMÉ:

Le domaine de la traction électrique a suscité un intérêt croissant ces dernières années. Afin que les véhicules électriques puissent remplacer ceux équipés de moteurs à combustion interne, une amélioration significative des performances électromagnétiques et énergétiques est nécessaire. Le choix du moteur à réluctance variable à commutation électronique (MRV) comme solution de traction électrique légère est motivé par sa construction simple, sa fiabilité élevée, son coût réduit et son poids allégé. Toutefois, la commande de ce type de machine présente certaines contraintes, notamment l'ondulation du couple et le bruit acoustique, qui constituent ses principaux inconvénients. Dans ce mémoire, la conception d'un MRV a été étudiée en respectant les performances énergétiques et les caractéristiques électromagnétiques du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) utilisé dans la Toyota Prius 2010. Afin de garantir un contrôle optimal, une commande floue de vitesse est appliquée au moteur. Elle est associée à une technique spécifique de réduction des ondulations de couple.

Mots clés: Machine à réluctance variable (MRV), Moteur synchrone à aimant permanent (MSAP), Ondulation de couple, Logique floue (FLC).

ملخص:

مجال الجر الكهربائي شهد اهتمامًا متزايدًا في السنوات الأخيرة. ولتحقيق إمكانية استبدال المركبات الكهربائية بتلك المجهزة بمحركات الاحتراق الداخلي، فإنه من الضروري تحسين الأداء الكهربائي وكفاءة الطاقة بشكل كبير. يُعتبر المحرك ذو التردد المتغير ذو التبديل الإلكتروني (MRV) خيارًا مثاليًا لحلول الجر الكهربائي خفيف الوزن، حيث يتميز بالبساطة في التصميم، والموثوقية العالية، وانخفاض تكلفة التصنيع، والوزن الخفيف. ومع ذلك، فإن التحكم في هذا النوع من المحركات يواجه تحديات، أبرزها تموج العزم والضوضاء الصوتية، واللذان يعدان من أهم العوائق التقنية لهذا المحرك. في هذا البحث، تم دراسة تصميم محرك MRV مع مراعاة أداء الطاقة والخصائص الكهربائية لمحرك المزامنة المغناطيسية الدائم (PMSM) المستخدم في Toyota Prius 2010. لضمان تحكم مثالي، تم تطبيق منظم سرعة ضبابي على المحرك، إلى جانب تقنية مخصصة للحد من تموج العزم، مما يساهم في تحسين الاستقرار والاستجابة الديناميكية.

الكلمات المفتاحية: محرك التردد المتغير القابل للتبديل (MRV) ، المحرك المتزامن ذو المغناطيسات الدائمة (MSAP) ، تموج العزم ، المنطق الضبابي (FLC)

SOMMAIRE

LISTE DE FIGURE	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES SYMBOLES	
LISTE DES ABREVIATIONS	
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES VEHICULES ELECTRIQUE ET LES MOTEURS A RELUCTANCE VARIABLE

Parti I : Généralités sur les véhicules électrique

I.1.Introduction.....	3
I.2. Le Véhicule Electrique	3
I.2.1 Véhicule électrique hybride	4
I.2.2. Actualité sur les véhicules électriques hybrides	4
I.3. Classification des véhicules électriques hybride	5
I.3.1. Par architecture	5
I.3.1.1. Véhicules hybrides série	5
I.3.1.2. Véhicules hybrides parallèle	6
I.3.1.3. Véhicules hybrides combiné	6
I.3.2. Par hybridation	7
I.4. Les différentes configurations des véhicules hybrides.	7
I.4.1. Véhicules électriques mono moteur	8
I.4.2. Les véhicules électriques multi moteur	9
I.5. Description générale de la chaîne de traction	9
I.6. Moteurs électriques	10
I.6.1. Moteurs à courant continu	10
I.6.2. Moteurs asynchrone	10
I.6.3. Moteurs synchrone.....	11
I.6.3.a. Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)	19
I.6.3.b. Moteur synchrone à rotor bobiné.....	11
I.6.4. Moteurs synchrones à reluctance variable (MRV)	11
I.6.5. Choix de la machine à reluctance variable (MRV)	12
I.7. Avantages et inconvénients des véhicules électriques	13
I.7.1. Avantages des véhicules électriques	13

I.7.2. Inconvénients des véhicules électriques	13
 Partie II : Généralités sur les Moteurs à réluctance variable (MRV)	
I.8. Introduction	14
I.8.1. Machines à réluctance variables (MRV)	14
I.9. Constitution de la MRV	15
I.9.1. Principe de fonctionnement d'une MRV	16
I.9.2. Caractéristiques couple-vitesse	19
I.10. Différents types de la MRV	20
I.10.1. Machine synchrone à réluctance à stator lisse	20
I.10.2. MRV double denture	21
I.11. Différentes typologie de la MRV	21
I.11.1. Les MRV pures	22
I.11.2. Les MRV à effet vernier	22
I.11.3. Les MRV hybrides	23
I.12. Avantages et problématiques de la MRV	24
I.13. Conclusion	25
 CHAPITRE II : CONCEPTION ET SIMULATION DU MRV 24/16	
II.1 Introduction	27
II.2. Système transmission hybride de Toyota Prius 2010	27
II.3. Bloc batteries HV dans Toyota Pius 2010	28
II.4. Conception du MRV 24/16	29
II.4.1. Paramètre nominale du moteur	29
II.4.2. Spécifications des matériaux du MRV 24/16	31
II.4.3. Exploitation des résultats de conception du « MRV	32
II.5. Analyses des variations géométriques du MRV 24/16	35
II.5.1. Analyse de la conception du MRV	35
II.5.2. Diamètre du rotor	35
II.5.3. Longueur de l'entrefer	36
II.5.4. Arcs de pôles	36
II.5.5. Largeur de la culasse	37
II.5.6. Profondeur de l'encoche	38
II.5.7. Diamètre de l'arbre	38

II.6. Optimisation de la géométrie	39
II.7. Résultats d'analyse du modèle avec "MotorSolve"	40
II.7. 1. Couple électromagnétique	41
II.7. 2. Caractéristiques du couple électromagnétique-vitesse	43
II.7. 3. Inductance.....	44
II.7. 4. Densité du flux dans l'entrefer	44
II.7. 5. Les pertes.....	45
II.7.6. Caractéristiques électriques et mécaniques	45
II.8. Modèles non linéaires du MRV.....	46
II.9. Alimentation du MRV	47
II.10. Schéma bloc de simulation du modèle non linéaire du MRV.....	49
II.11. Conclusion.....	54

CHAPITRE III : COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE DE LA MRV

III.1. Introduction	56
III. 2. Régulation de la vitesse du moteur	56
III.2.1. Régulateur à action proportionnelle et intégrale PI.....	56
III.2.2. Structure du régulateur PI	58
III.2.3. Calcul des paramètres du régulateur PI	58
III.2.4. Schéma bloc de réglage de la vitesse par régulateur PI	60
III.3. Commande du MRV par logique floue	67
III.3.1. Structure du contrôleur flou	67
III.3.2. Définition des variables du système	68
III.3.3. Schéma bloc de réglage de la vitesse par contrôle flou	70
III.4. Analyse comparative de la régulation PI et FLC pour le MRV 24/16	77
III.4.1. Ondulation de couple	77
III.4.2. Régulation de vitesse	79
III.5. Cycle de conduite WWLTC	80
III.5.1. Résultats de la simulation.....	81
III.6. Conclusion	82
CONCLUSION GENERALE.....	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

LISTE DE FIGURES

CHAPITRE I

Figure I - 1 : Système d'entraînement d'un VE.....	4
Figure I - 2 : Schéma structurel d'un véhicule hybride série.....	5
Figure I - 3 : Schéma structurel d'un véhicule hybride parallèle.....	6
Figure I - 4 : Schéma structurel d'un véhicule hybride combiné	7
Figure I - 5 : Solution monomoteur	8
Figure I - 6 : solution multi-moteurs.....	8
Figure I - 7 : Moteur roue.....	9
Figure I - 8 : Chaîne de traction dans un VE.....	9
Figure I - 9 : Vue en coupe dans un moteur à reluctance variable	14
Figure I - 10 : séquences d'alimentation des enroulement MRV 8/6	15
Figure I - 11: Structure d'une MRV 6/4.....	16
Figure I - 12 : Machine à reluctance variable structure élémentaire	16
Figure I - 13 : Structure de la MRV de base et positions extrêmes du rotor	17
Figure I - 14 : Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor	18
Figure I - 15 : Structure électromagnétique d'une MRV 8/6.....	18
Figure I - 16 : Position d'opposition et de conjonction d'une MRV 8/6	19
Figure I - 17 : Caractéristique couple vitesse d'un moteur à réluctance variable.....	19
Figure I - 18: MRV à stator lisse.....	20
Figure I - 19: MRV à double denture	21
Figure I - 20 : MRV purs à grosse dents.....	22
Figure I - 21 : MRV à effet vernier à stator externe et interne	23
Figure I - 22 : Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance	23
Figure I - 23 : MRV hybride à effet vernier.....	24
Figure I - 24 : MRV à plots aimants.....	24

Chapitre II

Figure II - 1 Schéma de système de transmission hybride Toyota Prius 2010.....	28
Figure II - 2 Batterie Lithium-ion (Li-ion) à haute tension.....	29
Figure II - 3 : Modèle de moteur à réluctance variable dans logiciel MotorSolve....	32
Figure II - 4 : Les données globales du MRV 24/16 étudié sous MotorSolve.	32
Figure II - 5 : Modèle final du MRV 24/16 sous MotorSolve.....	33
Figure II - 6 : Les paramètres de stator et rotor du MRV 24/16.....	33
Figure II - 7 : La page des résultats.....	34
Figure II - 8 : Les matériaux du noyau des composants du moteur.....	34
Figure II - 9 : Caractéristiques de couple statique de la phase 1	41
Figure II - 10 : Forme d'onde du couple électromagnétique généré	42
Figure II - 11 : Forme d'onde du couple électromagnétique généré	42

Figure II - 12 : Caractéristique couple _vitesse du moteur model.....	43
Figure II - 13 : Inductance en fonction de position du rotor.	44
Figure II - 14 : Forme d'onde de la densité de flux dans l'entrefer.....	44
Figure II - 15 : Couple et la puissance de sortie générée par le MRV.....	45
Figure II - 16 : Vecteurs électromagnétiques.....	46
Figure II - 17 : Diagramme de simulation de MRV par phase....	47
Figure II - 18 : Schéma de la structure générale de convertisseur.....	48
Figure II - 19 : Schéma de simulation des trois bras de convertisseur	48
Figure II - 20 : Schéma bloc de simulation du modèle non linéaire de la MRV.....	49
Figure II - 21 : Schéma bloc des trois phases du moteur MRV	49
Figure II - 22 : Schéma bloc de simulation de la phase 1	50
Figure II - 23 : Schéma bloc d'application des ongles θ_{on} et θ_{off}	50
Figure II - 24 : Flux magnétique à vide des trois phases en fonction du temps	51
Figure II - 25 : Courants à vide des trois phases en fonction du temps	51
Figure II - 26 : Couple électromagnétique total a vide en fonction du temps.....	51
Figure II - 27 : Vitesse de rotation à vide en fonction du temps	52
Figure II - 28 : Flux magnétique en charge des trois phases en fonction du temps ..	52
Figure II - 29 : Courants en charge des trois phases en fonction du temps	53
Figure II - 30 : Couple électromagnétique total en fonction du temps	53
Figure II - 31 : Vitesse de rotation en fonction du temps	53

CHAPITRE III

Figure III - 1 : Schéma structurel de la commande PI.....	57
Figure III - 2 : Schéma de régulateur PI	58
Figure III - 3 : Schéma bloc de régulation de la vitesse.....	58
Figure III - 4 : Schéma bloc de réglage de la vitesse par régulateur PI	60
Figure III - 5 : Courant des phases en fonction du temps	61
Figure III - 6 : Flux magnétique en fonction du temps.....	61
Figure III - 7 : Couple électromagnétique en fonction du temps	62
Figure III - 8 : Vitesse de rotation à vide en fonction du temp	62
Figure III - 9 : Courant des trois phases en fonction du temps.....	63
Figure III - 10 : Flux magnétique en fonction du temps	63
Figure III - 11 : Couple électromagnétique en fonction du temps	64
Figure III - 12 : Vitesse de rotation en charge en fonction du temps	64
Figure III - 13 : Courants des phases en fonction du temps.....	65
Figure III - 14 : Flux magnétique en fonction du temps	65
Figure III - 15 : Couple électromagnétique en fonction du temps	66
Figure III - 16 : Vitesse de rotation en fonction du temps	66
Figure III - 17 : Schéma fonctionnel de la régulation floue de la MRV	67
Figure III - 18 : Schéma-bloc de contrôleur flou de la vitesse (FLC)	68
Figure III - 19 : Schéma d'un système FLC pour la méthode d'inférence Mamdani....	68
Figure III - 20 : Fonctions d'appartenances des entrées.....	68
Figure III - 21 : Fonction d'appartenance de la sortie	69

Figure III - 22 : Surface d'inférence floue (FLC)	70
Figure III - 23 : Schéma bloc de réglage de la vitesse par contrôleur flou (FLC).....	70
Figure III - 24 : Courants des phases à vide en fonction du temps	71
Figure III - 25 : Flux magnétique à vide en fonction du temps.....	71
Figure III - 26 : Couple électromagnétique à vide en fonction du temps	72
Figure III - 27 : Vitesse de rotation à vide en fonction du temps.....	72
Figure III - 28 : Courants des phases en charge en fonction du temps	73
Figure III - 29 : Flux magnétique en charge en fonction du temps	73
Figure III - 30 : Couple électromagnétique en charge en fonction du temps.....	74
Figure III - 31 : Vitesse de rotation en charge en fonction du temps	74
Figure III - 32 : Courants des phases lors d'inversion de la rotation	75
Figure III - 33 : Flux magnétique lors d'inversion de la rotation	75
Figure III - 34 : Couple électromagnétique lors d'inversion de la rotation	76
Figure III - 35 : Vitesse inversion de rotation en fonction du temps.....	76
Figure III - 36 : Couple électromagnétique avec et son régulateur PI, FLC.....	78
Figure III - 37 : Réponse de vitesse sans et avec commande PI, FLC	79
Figure III - 38 : Cycle européen de conduite WLTC.....	80
Figure III - 39 : Profile de Vitesse de référence WLTC	81
Figure III - 40 : Vitesse linéaire du MRV en Km/h.....	81
Figure III - 41 : Zoom de Vitesse linéaire du MRV en Km/h.....	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I - 1 : Comparaison des quatre machines de traction électrique	12
Tableau II - 1 : Paramètres électrique et mécanique du MRV 24/16	29
Tableau II - 2 : Paramètres géométrique du MRV	30
Tableau II - 3 : Comparaison entre IPMSM et MRV	31
Tableau II - 4 : Matériaux utilisés dans le MRV.....	31
Tableau II - 5 : Rapport recommandé entre le diamètre du rotor et le stator.....	36
Tableau II - 6 : Valeurs spécifique des paramètres géométriques de la MRV	39
Tableau II - 7 : Taux d'ondulation pour les 3 conceptions	43
Tableau II - 8 : Pertes générées par la MRV	45
Tableau II - 9 : Commutation des IGBT	48
Tableau III -1 : Taux d'ondulation en régime permanent	77

LISTE DES SYMBOLES

α_s : Pas statorique

α_r : Pas rotorique

θ_m : Angle mécanique

θ_e : Angle électrique

N_s : Le nombre de pôles du stator

N_r : Le nombre de pôles du rotor

C_{em} : Couple électromagnétique

L : L'inductance

σ : contrainte de cisaillement

J : moment d'inertie

ζ : coefficient d'amortissement

f_r : coefficient de frottement visqueux

Br : Arc polaire rotor

Bs : Arc polaire stator

W_r : largeur des dents rotor

W_s : largeur des dents stator

D_{sh} : diamètre de l'arbre

g : épaisseur de l'entrefer

Θ_{on} : Angle de commutation

Θ_{off} : Angle de commutation

I_{ref} : Courant de référence

E_ω : L'erreur de vitesse

ΔE_ω : La variation de l'erreur de vitesse

T_{max} : le couple maximal

T_{min} : le couple minimal

ΔT : Variation de couple

B : l'induction magnétique

H : Le champ magnétique

LISTE DES ABREVIATIONS

MRV : Machine à Réluctance Variable

MRVDS : Machine à Réluctance Variable à Double Saillance

SRM: switched reluctance motor

IPMSM: the interior permanent-magnet synchronous motor

VEH : véhicule électrique hybride

VE : véhicule électrique

MSAP : moteur synchrone à aimant permanent

MCC : machines à courant continu

MAS : machine asynchrone

MEF : méthode des éléments finis

WLTC: worldwide harmonized light vehicles Test Cycle

UDC: Urbain Drive Cycle

EUDC : Extra Urbain Drive Cycle

FLC : contrôleur à logique floue

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La réduction de la consommation des hydrocarbures et, par conséquent, des émissions polluantes dans le secteur automobile constitue un enjeu majeur. Le marché des véhicules écologiques se développe de plus en plus. En conséquence, la nécessité de rendre les automobiles plus respectueuses de l'environnement, associée à la demande émergente de consommateurs soucieux de ces enjeux, incite les constructeurs à proposer des véhicules moins énergivores. Cette approche permet de réduire la consommation de pétrole pour ce type d'application et d'éliminer les émissions de gaz à effet de serre, notamment en milieu urbain [1].

Toutefois, la transition d'un parc automobile mondial quasi-exclusivement alimenté par le pétrole vers un parc de véhicules entièrement électriques ne peut se faire du jour au lendemain. Il est crucial de respecter certaines contraintes industrielles et économiques incontournables. Le passage des véhicules conventionnels aux véhicules électriques doit donc s'effectuer progressivement, en s'appuyant sur les technologies actuellement bien maîtrisées [2].

Ce secteur entraînera dans les années à venir une importante activité de recherche et de développement de la part des constructeurs, car de nombreuses solutions apparaissent et doivent encore faire leurs preuves. Aujourd'hui, divers systèmes de gestion de l'énergie ont été définis pour les véhicules électriques, mais il existe encore de nombreuses opportunités pour renforcer et simplifier les architectures électriques, ainsi que pour améliorer l'adéquation entre le véhicule et son infrastructure de charge [2].

La machine à réluctance variable présente plusieurs avantages qui pourraient convaincre les industriels du domaine de la construction de voitures électriques. Elle n'a pas besoin d'aimants permanents dans sa conception, est robuste, de coût réduit, simple à fabriquer et intrinsèquement tolérante aux défauts grâce à sa redondance. Cependant, cette machine a deux inconvénients majeurs : une ondulation de couple importante et la production d'un bruit acoustique élevé.

L'objectif de cette étude est d'intégrer une machine à réluctance variable à trois phases de type 24/16 pôles dans la chaîne de traction des véhicules électriques. Pour assurer un fonctionnement sûr et améliorer les performances de la chaîne de traction, nous proposons une étude d'un moteur à réluctance variable à commutation électronique (MRV) 24/16, commandé par des régulateurs à techniques intelligentes pour un entraînement à vitesse variable, afin de réduire l'ondulation du couple et diminuer le bruit acoustique.

Dans le premier chapitre, je présente d'abord les généralités concernant les véhicules électriques en expliquant leur fonctionnement global et en mettant en évidence les facteurs essentiels qui justifient le choix du moteur à réluctance variable comme moteur de traction, puis nous aborderons le principe de fonctionnement de ce moteur en détaillant ses avantages et ses inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, je présente l'élaboration d'un modèle du moteur MRV 24/16 en utilisant le logiciel MotorSolve. L'optimisation des paramètres géométriques vise à réduire les ondulations de couple et améliorer les performances globales. Les données magnétiques obtenues serviront à la création de tables de correspondance pour la simulation du modèle non linéaire du moteur MRV sous MATLAB/Simulink.

Le troisième chapitre intégrera une commande PI et une commande FLC pour minimiser les ondulations de couple du moteur MRV. La commande PI offrira une approche classique basée sur la régulation proportionnelle et intégrale, tandis que la commande FLC exploitera les avantages de la logique floue pour une gestion plus adaptative et robuste des variations de couple. L'analyse comparative entre ces deux stratégies permettra d'identifier la méthode la plus efficace selon les critères de stabilité et de performance.

CHAPITRE I

Généralités sur les Véhicules électriques et les moteurs à réluctances variables

Parti I : Généralités sur les véhicules électrique

I.1 Introduction

Dans un temps où l'activité humaine et le potentiel économique ne cessent d'évoluer, le XX^{ème} siècle a connu un réchauffement climatique jamais enregistré auparavant. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration des gaz polluants entre autres le CO₂ dans l'atmosphère dues à l'activité humaine. Le secteur des transports est désormais le secteur le plus accusé des gaz à effet de serre, c'est la raison pour laquelle l'industrie de l'automobile s'intéresse précieusement au phénomène de la pollution afin d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre et contribuer à une vie plus saine, et propose le véhicule électrique pour améliorer la qualité de l'air [1].

Les véhicules électriques (VE) et hybrides (VEH) constituent actuellement une alternative potentielle face aux véhicules conventionnels à carburant d'origine fossile, permettant aux constructeurs de véhicules de se focaliser sur l'objectif de pouvoir répondre aux quantités et quantités exigées par les utilisateurs (performances et consommation) s'aligner aux lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants) [1]. Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur la voiture électrique tout en mettant en évidence les principaux composants de la chaîne de traction en citant les différentes configurations. Nous soulignerons aussi leurs avantages et inconvénients.

I.2 Le véhicule électrique

Les véhicules électriques se distinguent par leur propulsion assurée par un ou plusieurs moteurs électriques, qui transmettent la force motrice aux roues via un système de transmission approprié. Grâce aux avancées scientifiques et technologiques réalisées dans le domaine de l'électronique de puissance, de nombreuses idées et nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces recherches sont liées à des problématiques communes : la production, le stockage et l'utilisation de l'électricité [2]. Le système d'entraînement constitue la partie principale du véhicule électrique. Il est activé par un ou plusieurs moteurs électriques et comprend un système de transmission conçu pour entraîner deux ou quatre roues motrices [3].

L'architecture est très simple. Elle se compose d'un actionneur électrique, d'un dispositif de transmission des roues.

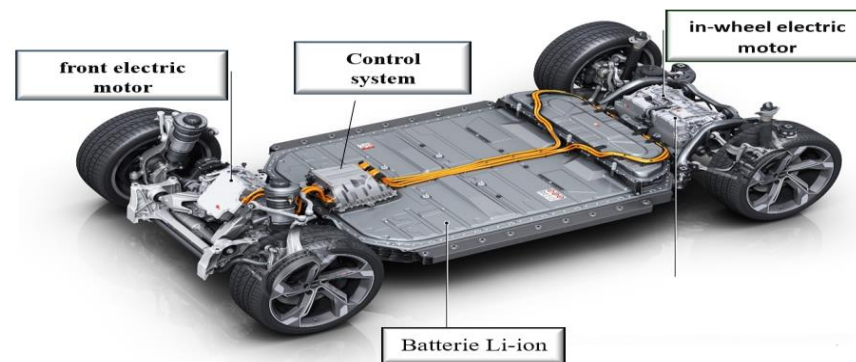


Figure I-1 : Système d'entraînement d'un VE

I.2.1 Véhicule électrique hybride

Les véhicules hybrides combinent généralement un moteur thermique traditionnel (essence ou diesel) avec un ou plusieurs moteurs électriques et des batteries pour le stockage d'électricité. Ces systèmes peuvent fonctionner ensemble ou indépendamment. Les véhicules hybrides sont équipés d'un moteur thermique et d'un moteur électrique qui travaillent en tandem selon la vitesse et l'accélération du véhicule. Le moteur électrique améliore les performances du moteur thermique et prolonge l'autonomie du véhicule. Il existe deux principaux types de systèmes d'entraînement hybrides : les systèmes parallèles et les systèmes en série, qui diffèrent par leur manière d'intégrer le fonctionnement des deux sources d'énergie [4].

I.2.2 Actualité sur les véhicules électriques hybrides

Actuellement, les véhicules électriques hybride (VEH) proposés par les constructeurs possèdent des batteries permettant des autonomies variant de 70 à 200 km. L'introduction de la pile à combustible a considérablement augmenté cette autonomie, atteignant actuellement 400 à 450 km, ce qui est proche des valeurs des véhicules thermiques classiques, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives. La puissance des VE varie d'environ 15 kW à environ 100 kW [2]. Le choix de la puissance dépend de l'utilisation du véhicule : 20 à 30 kW suffisent pour une voiture urbaine, tandis que 40 à 70 kW sont préférables pour une voiture destinée aux routes. En ce qui concerne le prix de ces véhicules, il reste difficile à évaluer car la production en est encore très limitée. Néanmoins, on peut estimer que si les technologies d'alimentation utilisées (batteries, pile à combustible) étaient produites en grande série, les prix pourraient devenir comparables à ceux des véhicules thermiques, la part la plus importante du coût étant constituée par l'alimentation [3].

I.3 Classification des véhicules électriques hybride

Les véhicules hybrides sont généralement classés selon deux catégories. La première dépend de l'architecture tandis que la seconde considère le taux d'hybridation du véhicule [5].

I.3.1 Par architecture :

La classification par architecture examine la disposition des composants de la chaîne de traction des véhicules électriques hybrides. Les trois grandes familles d'architectures série, parallèle et mixte (série-parallèle) regroupe la majorité des combinaisons d'agencement des constituants de la chaîne énergétique des VEHS prototypés ou déjà commercialisés [5].

I.3.1.1 Véhicules hybrides série

Dans un système hybride en série, l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique est produite par un alternateur entraîné par un moteur thermique qui fonctionne à une vitesse de rotation constante. Les deux moteurs sont donc disposés en série. En choisissant une vitesse de rotation optimale pour le moteur thermique, on peut maximiser son rendement, ce qui augmente la quantité de carburant brûlée par cycle moteur et réduit les émissions de gaz. De plus, la signature acoustique du moteur thermique peut être améliorée grâce à cette vitesse de rotation fixe [1].

Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure (I.2) :

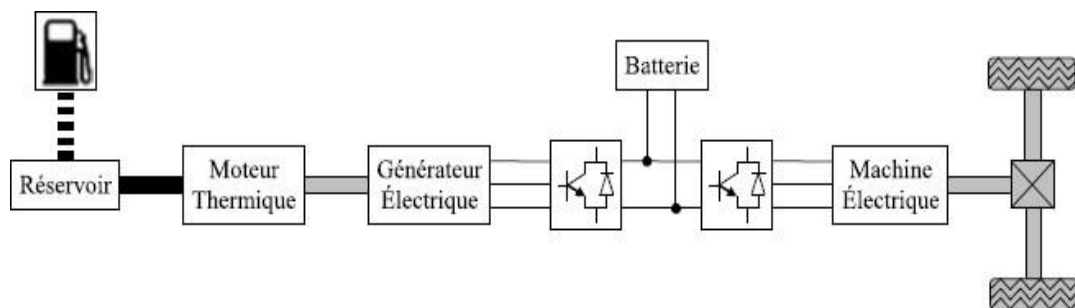


Figure I-2 : Schéma structurel d'un véhicule hybride série

Dans un système hybride en série, l'essentiel de l'énergie électrique nécessaire pour alimenter le moteur électrique provient de la génératrice. La batterie ne sert qu'à tamponner les pointes d'énergie et à permettre un mode tout électrique. Cependant, un inconvénient majeur de cette architecture est son faible rendement global, car l'énergie mécanique du moteur thermique est d'abord convertie en énergie électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconvertie en énergie mécanique par le moteur électrique [4]. Cela dit, du point de vue de la gestion, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis indépendamment des conditions de conduite.

I.3.1.2 Véhicules hybrides parallèle

L'idée principale de véhicule hybride parallèle (VHP) est de combiner les avantages de deux types de moteurs : un moteur électrique et un moteur thermique. Le VHP utilise ces deux moteurs séparément, ce qui permet de résoudre plusieurs problèmes. En milieu urbain, le mode électrique est utilisé pour réduire les émissions polluantes [2]. Pour les longs trajets hors des villes, le moteur thermique prend le relais, augmentant ainsi l'autonomie du véhicule.

Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure (I.3) :

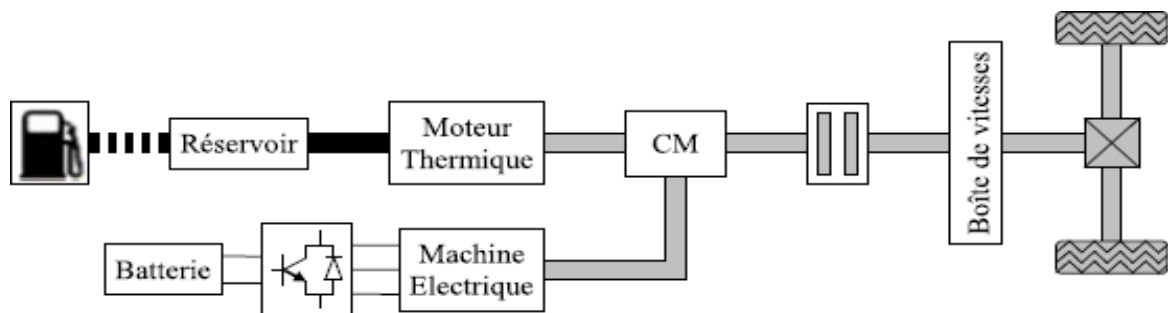


Figure I-3 : Schéma structurel d'un véhicule hybride parallèle

Le moteur électrique joue habituellement aussi le rôle d'un générateur entraîné par le moteur thermique pour recharger les batteries lorsque la puissance électrique n'est pas requise pour propulser le véhicule.

I.3.1.3 Véhicules hybrides combiné

Les architectures combinées, ou hybrides série/parallèle, également connues sous le nom d'hybrides parallèles à dérivation de puissance, intègrent un moteur électrique, une génératrice et un moteur thermique. Une gestion efficace des puissances demandées et fournies permet de contrôler le régime du moteur thermique et de répartir son couple entre les besoins du véhicule et la recharge de la batterie [4]. Schéma de fonctionnement d'un hybride combiné est illustré dans la figure I-4.

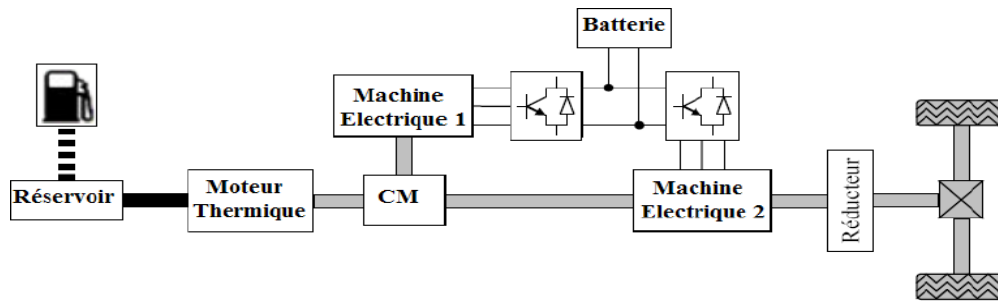


Figure I-4 : Schéma structurel d'un véhicule hybride combiné

I.3.2 Par hybridation :

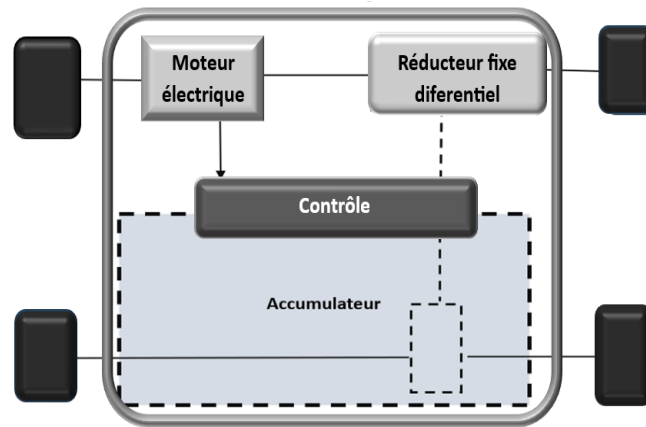
La classification par hybridation consiste à hiérarchiser les véhicules électriques hybrides en fonction du ratio (exprimé en %) entre la capacité de puissance disponible à partir de la seconde source d'énergie (typiquement des batteries ou super condensateurs dans le cas décrit) par rapport à la puissance totale disponible embarquée dans le véhicule. Quatre catégories sont à considérer : le "Micro-hybride", le "Mild-hybride", le "Full-hybride" et le "Plug-in hybride". Il est important de souligner qu'une définition universelle de la classification par hybridation n'existe pas. Certains auteurs considèrent les fonctionnalités du véhicule (par exemple la capacité en mode tout électrique, l'arrêt du MCI à l'arrêt du véhicule, etc.). Le typique taux d'hybridation, performances énergétiques et puissance totale embarquée ne conduit pas à une relation triviale, de ce fait la puissance de la machine électrique est considérée pour une classification par hybridation. Ainsi, en respectant l'ordre précédent de citation des quatre catégories, les puissances des machines électriques sont respectivement égales à 3kW, 10kW, 50kW et $\geq 30\text{kW}$ [5].

I.4 Les différentes configurations des véhicules hybrides

Notre objectif est de créer une liste non exhaustive de solutions potentielles pour les problèmes de motorisation des véhicules électriques. Ces solutions peuvent inclure des configurations avec un seul moteur ou plusieurs moteurs.

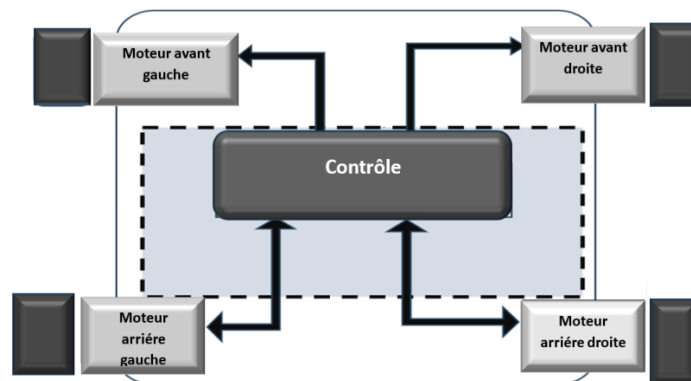
I.4.1 Véhicules électriques mono moteur

L'architecture mono moteur (Figure I.5) qui emploie un moteur à courant continu, une batterie plus un variateur (un hacheur réversible) en série et un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple).

**Figure I-5 : Solution monomoteurs**

I.4.2 Véhicules électriques multi moteur

Pour les VE multi moteur on trouve deux grandes architectures, l'une utilise une double chaîne de traction à l'aide de deux moteurs à courant continu qui permet d'avoir plus de fiabilité cotée moteur, l'autre utilise un moteur asynchrone et deux moteurs roue pour permettre d'augmenter le différentiel mécanique du véhicule [2].

**Figure I-6 : Solution multi-moteurs**

Le moteur roue électrique est semblable à un moteur classique, mais se distingue par son agencement. Plutôt qu'un unique moteur sous le capot, il intègre deux à quatre moteurs plus petits directement dans les roues du véhicule, tandis que les batteries restent placées à l'intérieur de la voiture. Ce système permet un contrôle précis et indépendant du couple appliqué à chaque roue, maximisant également la capacité de freinage régénératif [3]. Utiliser ce type de moteur sur des roues directrices élimine les parties mécaniques de la transmission, permet de commander les roues indépendamment et libère de l'espace dans le véhicule. Cependant, cette configuration présente des inconvénients, comme l'augmentation de la masse non-suspendue et la difficulté d'intégrer un réducteur. Un moteur à fort couple dans la roue peut potentiellement déstabiliser le véhicule.



Figure I-7 : Moteur-roue

I.5. Description générale de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaîne de tractions ont décrits dans la figure (I.8) :

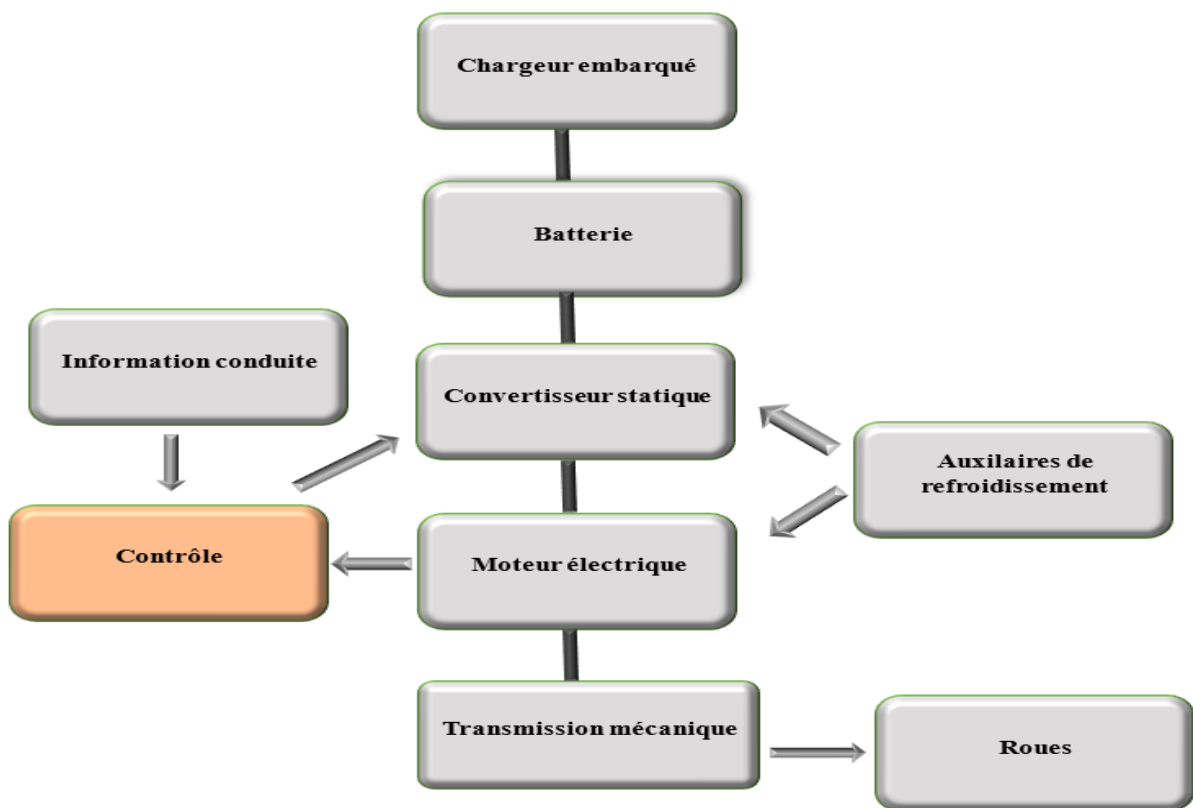


Figure I-8 : Chaîne de traction dans un VE

Lorsqu'on commence par le réseau d'alimentation alternatif, le système comprend un chargeur de batteries, une batterie électrochimique embarquée, un ensemble convertisseur statique pour le moteur électrique, ainsi qu'un système de contrôle. La transmission mécanique adapte la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur. Pour analyser la consommation totale, il est essentiel de prendre en compte les auxiliaires, tels que le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique. La gestion des flux d'énergie entre ces composants est encore à l'état de recherche [6].

I.6 Moteurs électriques

Ce dispositif joue un rôle clé dans l'architecture des véhicules électriques, contribuant à leur efficacité et à leur performance son, principe de fonctionnement est basé essentiellement sur l'interaction électromécanique. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source, en énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule durant les phases de traction, ou inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage, pour permettre la récupération d'énergie (régénération). Lors du freinage, la chaîne mécanique devient en partie la source de puissance, et la source d'énergie principale (batterie) devient le récepteur. D'un point de vue industriel, les principaux types de machines électriques adoptées ou en cours d'évaluation pour les VEH comprennent la machine à courant continu (CC) qui a été abandonnée, la machine asynchrone (MAS), les machines synchrones à aimants ou rotor bobiné (MS) et le moteur à reluctance variable (MRV) [3].

I.6.1 Moteur à courant continu

Le moteur à courant continu avec balais (Brushed DC motor) est l'un des premiers modèles de moteurs électriques, apprécié pour son couple de démarrage élevé et son contrôle simple de la vitesse, ce qui en a fait une solution populaire pour les applications de traction telles que les trains et véhicules électriques. Cependant, malgré ces atouts, il présente plusieurs inconvénients, notamment un entretien régulier dû à l'usure des balais et du collecteur, une efficacité inférieure aux autres machines électriques, ainsi qu'un rapport poids/puissance moins favorable. Un rendement maximal de 90% rend ce moteur un peu obsolète pour son utilisation dans un véhicule électrique. Grace à les technologies avancent, notamment dans les domaines des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, les moteurs asynchrones (à induction) et synchrones à aimants permanents gagnent en popularité, offrant de meilleures performances et une gestion optimisée du flux énergétique pour les véhicules électriques modernes. Ainsi, bien que les moteurs à courant continu aient marqué une époque, l'évolution technologique tend à privilégier des alternatives plus fiables et performantes.

I.6.2 Moteur asynchrone (MAS)

Le moteur asynchrone, réputé pour son rendement élevé et sa forte puissance massique, exploite le principe du glissement, c'est-à-dire que le rotor tourne à une vitesse inférieure à celle du stator. Bien que ce phénomène soit essentiel à la conversion d'énergie, il constitue également sa principale faiblesse : plus le glissement est important, plus le rendement diminue. Ces moteurs à induction sont privilégiés en industrie et en traction électrique, surpassant les moteurs à courant continu en termes de maintenance. Ils équipent de nombreux véhicules électriques (Zoé, Leaf, e-Golf...) ainsi que des hybrides (Prius, BMW i8, Mercedes-Benz S500Plug-InHybrid...)[2]. La machine asynchrone (MAS) se compose d'un stator dont le bobinage est relié à un variateur de

vitesse et d'un rotor ferromagnétique équipé de conducteurs en court-circuit parcourus par des courants induits. Cette configuration assure une conversion énergétique efficace et optimise ainsi les performances des véhicules électriques et hybrides.

I.6.2 Moteur synchrone

Malgré le fait qu'il soit plus délicat à piloter, plus coûteux et potentiellement moins robuste, le moteur synchrone est devenu le choix privilégié dans les véhicules électriques et hybrides. La machine synchrone offre un excellent rendement en tant que générateur et moteur. Comme le moteur asynchrone, le moteur synchrone est composé d'un stator et d'un rotor, séparés par un entrefer. La principale différence réside dans la conception du rotor. Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons deux types les plus fréquents dans la littérature :

a– Moteur synchrone a aimants permanents (MSAP)

La machine synchrone à aimants permanents se distingue par son haut rendement, son faible encombrement et sa dissipation thermique efficace, notamment pour les solutions moteur-roue. Toutefois, sa caractéristique puissance-vitesse et la gestion du défluxage nécessitent une optimisation rigoureuse, car un défluxage mal maîtrisé peut entraîner la démagnétisation des aimants et réduire son rendement.

b- Moteur synchrone a rotor bobiné

Le moteur synchrone à rotor bobiné est une machine électrique dont le rotor est constitué d'un enroulement alimenté en courant continu via des bagues et balais. Ce type de moteur fonctionne à vitesse constante, synchronisée avec la fréquence du réseau. Il offre un contrôle précis de la vitesse et du facteur de puissance, ce qui le rend adapté aux applications industrielles lourdes. Grâce à l'excitation indépendante du rotor, il peut fonctionner en mode moteur ou alternateur. Il est cependant plus complexe et nécessite un système d'alimentation pour l'excitation.

I.6.4 Moteur à reluctance variable (MRV)

Les machines à réluctance variable (MSRVs) intéressent l'industrie automobile grâce à leur construction simple, leur tolérance aux pannes et leur adaptation à la traction électrique. Elles présentent une commande simplifiée et une bonne caractéristique couple-vitesse. Toutefois, elles souffrent de bruit acoustique, d'ondulations de couple et nécessitent un convertisseur adapté. Sur le plan fonctionnel, le rotor des MRVs ne comporte ni aimants ni bobinage d'excitation, et le couple est généré uniquement par l'effet de réluctance. Le stator est semblable à celui utilisé dans la majorité des machines à courant alternatif. Pour optimiser cette production de couple, le rotor est conçu pour maximiser le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et l'axe en quadrature (L_d/L_q). Ce rapport détermine directement la plage de fonctionnement en vitesse à puissance

constante ainsi que le facteur de puissance. Cependant, atteindre un rapport L_d/L_q élevé impose des contraintes au niveau de la fabrication qui se traduisent par une augmentation du coût. Chacun de ces moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté de la commande qui s'affrontent [7].

I.6.5 Choix de la machine à reluctance variable MRV

Une comparaison quantitative des quatre machines en fonction des critères spécifiques à la traction électrique, est résumée dans le tableau I.1. Chaque machine est évaluée sur la base de 7 critères sur une échelle de 0 à 5, la note 5 correspondant à la meilleure réponse au critère [24, 25].

Tableau I - 1 : Comparaison des quatre machines de traction électrique

Machine Critère	MCC	MAS	MSAP	MRV
Plage de vitesse	2.5	4.5	4.5	5
Performance énergétique	2	4	5	4
Poids	2	3	4	5
Coût	5	4	3	5
Fiabilité	2	4	3	5
Densité de puissance	1	4	5	3
Partie d'alimentation	4	5	3	2
Total	18.5	28.5	27.5	29

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser le moteur à réluctance variable (MRV) en raison de ses avantages technologiques, tels qu'un excellent rendement en mode générateur et moteur, ainsi qu'un couple massique élevé. Le véhicule électrique envisagé sera propulsé par deux roues motrices avant, entraînées par un moteur MRV 24/16 pôles, via une transmission différentielle fixe.

I.7 Avantages et inconvénient des véhicules électriques

I.7.1 Avantages des véhicules électriques

La voiture électrique possède plusieurs avantages qu'il après dominant sur les véhicules à combustion interne et qu'on peut les énumérer comme suit [9]- [11]:

- Les véhicules électriques sont dépourvus de pollution sonore puisqu'ils sont totalement silencieux.
- Les véhicules électriques sont agréables à conduire, avec un roulement qualifié de « doux » en raison d'une accélération continue et progressive car le moteur ne cale jamais (absence d'embrayage).
- L'architecture technique des véhicules électriques est simple il est composé de 6000 pièces de moins qu'une auto traditionnelle.
- Ces véhicules sont plus faciles d'entretien et leurs dépenses sont réduites de 30 à 40% (par exemple le moteur électrique ne requiert pas de vidange). De plus, les occasions de pannes sont 3 fois moins nombreuses.
- Les véhicules électriques ne consomment pas d'énergie dans les embouteillages et les freinages (la voiture se recharge seule). Ils sont donc très adaptés au milieu urbain qui sera le principal mode d'habitat du futur (mégapole).
- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3fois plus élevé que celui d'un moteur thermique.
- Le démarrage est très rapide, il suffit d'appuyer sur un bouton pour quelle se mette en marche (fini les problèmes de démarrages pendant les temps froids d'hiver).

I.7.2 Inconvénients des véhicules électriques

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des cotés négatifs :

- Une masse élevée des accumulateurs entraîne une autonomie réduite.
- La durée de vie des batteries reste limitée, et la puissance du moteur électrique demeure insuffisante.
- La voiture se doit d'être la plus légère possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps.
- D'autant que comme tout produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.
- La durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitat clé de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.

Partie II : Généralités sur les Moteurs à réluctance variable (MRV)

I.8 Introduction

La machine à reluctance variable a été la première idée et la solution technique pour la conversion de l'énergie électromécanique et la conception des moteurs rotatifs, idée qui remonte vers la première moitié du 19^{ème} siècle. Son principe est basé sur un concept simple, il suffit d'exciter puis de désexciter les enroulements du stator d'une manière séquentielle et synchronisée avec la position des pôles rotoriques. Ainsi, et contrairement aux machines asynchrones et synchrones utilisant la théorie du champ tournant, la MRV est basée sur la notion de champ pulsant. On l'appelle aussi machine à aimantation induite (les dents du rotor sont magnétisées par induction et attirées par le champ magnétique généré par les enroulements du stator).

I.8.1 Machine a réluctance variable (MRV)

Les machines à réluctance variable qui font l'objet de notre étude, possèdent une double denture composée de N_r dents au rotor, un stator bobiné à N_s dents. Ces machines ont la particularité de ne pas comporter de circuit d'excitation. Les deux pièces polaires sont réalisées par un empilage de tôles en matériau ferromagnétique.

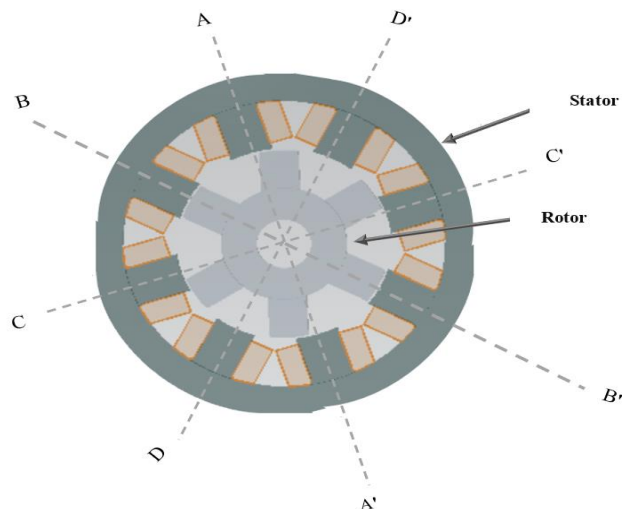


Figure I-9 : Vue en coupe d'un moteur a reluctance variable

Les machines à réluctance variable sont des machines pas à pas les plus utilisées pour des applications à vitesse constante. Cette machine possède un rotor ferromagnétique non aimanté et robuste présentant une saillance importante. Comme les machines synchrones à aimants permanents, elle possède un stator en matériau ferromagnétique comportant des dents sur lesquelles sont enroulées des bobines ce qui créent le champ magnétique (Figure I.9).

Elle emploie le concept simple d'un système électromécanique sur la base de l'attraction d'un élément ferromagnétique par un électro-aimant, Afin de rendre cette idée applicable pour un moteur rotatif, des enroulements logés dans les dents du stator (N_s) sont alimentés alternativement,

tandis que Nr dents du rotor, sans enroulements ni aimants, sont attirés adéquatement par les enroulements excités du stator. La figure 1.10 montre les séquences d'alimentations des quatre enroulements d'une MRV 8/6 (quatre phases).

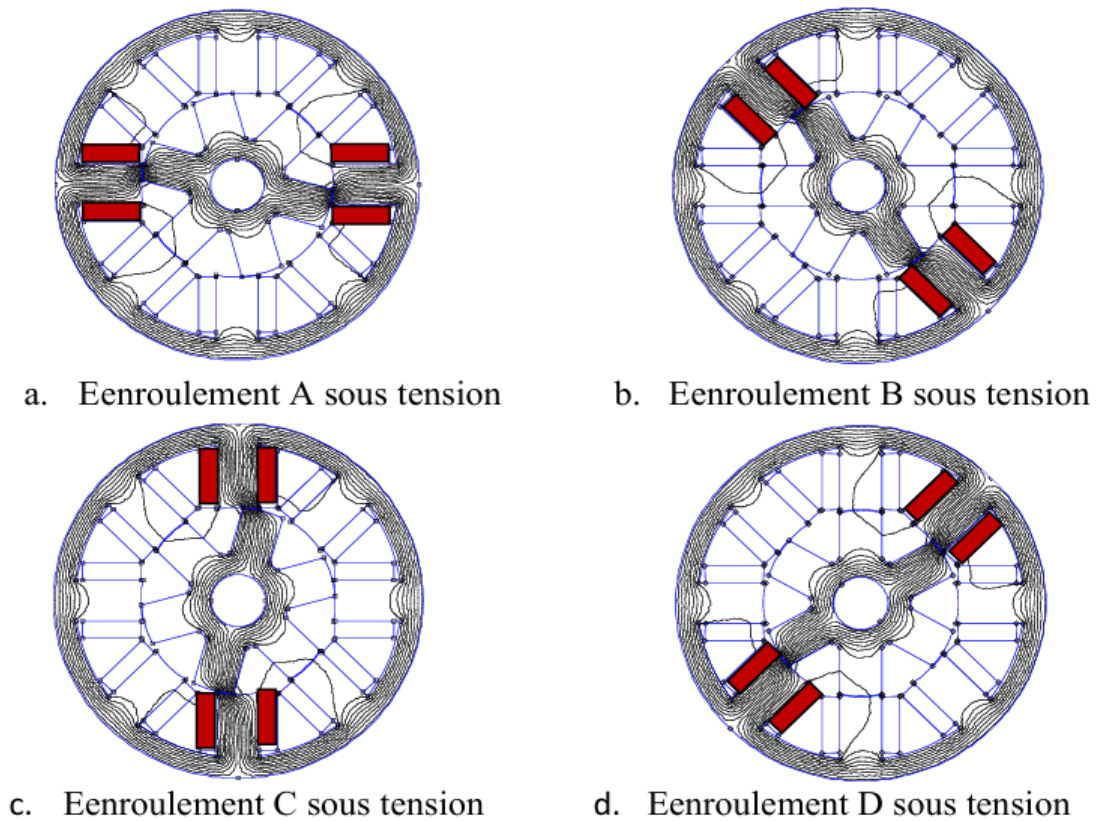


Figure I-10 : Séquences d'alimentation des enroulements MRV 8/6

I.9 Constitution de la MRV

Les MRV sont des machines à double denture et de structure simple qui ne possèdent ni bobinages ni aimants permanents au rotor. Chaque structure reçoit une appellation relative à son nombre de dents, par exemple "24/16" signifie : 24 dents au stator et 16 dents au rotor. Les circuits magnétiques du stator et du rotor sont construits à partir d'un empilage de tôles magnétiques (voir figure I.11) afin de minimiser au maximum les pertes par courant de Foucault.

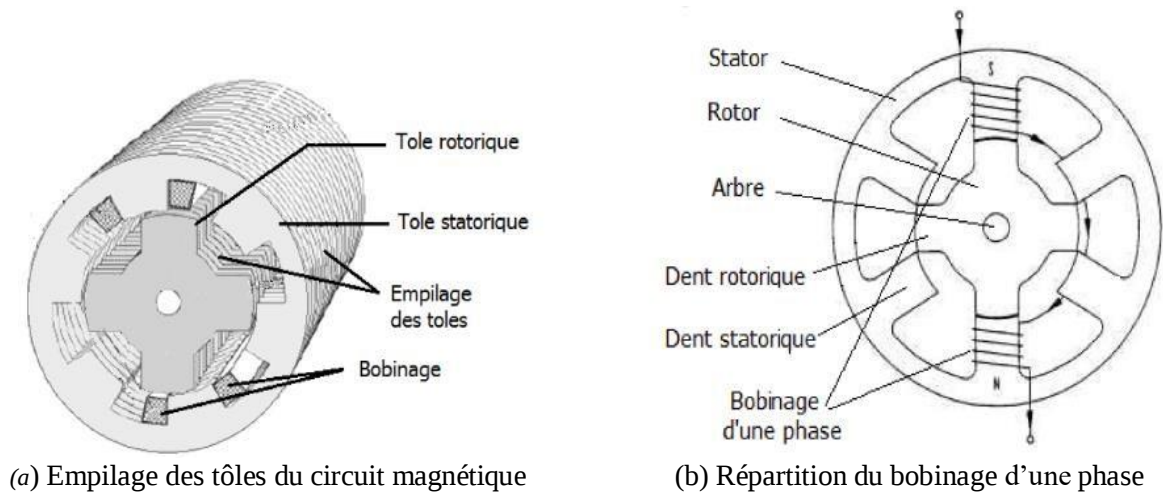


Figure I-11 : Structure d'une MRV 6/4 [3]

Cette constitution est simple et peu coûteuse relativement aux autres types de machines électriques, nécessite une électronique de commande spécifique. La machine à reluctance variable ne peut pas être alimentée directement avec une source continue ou alternative. Un convertisseur qui assure la commutation du courant dans les phases de la machine est indispensable pour son fonctionnement. Selon les applications, la machine à reluctance variable peut avoir plusieurs configurations. [10]

I.9.1 Principe de fonctionnement d'une MRV

Quel que soit le type de machine à reluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, Vernier à grosses dents...), le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire, identique à celle représentée (Figure I.12).

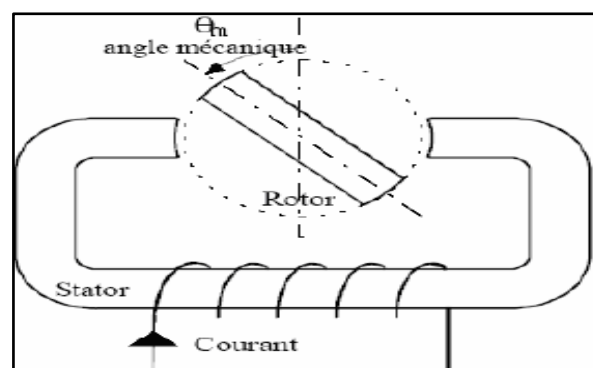


Figure I-12 : Machine à reluctance variable : structure élémentaire

Il s'agit d'un circuit magnétique simple constitué de deux pièces ferromagnétiques, l'une fixe (stator) comportant un enroulement à N spires parcourues par un courant I et l'autre mobile (rotor) autour d'un axe fixe. Soit θ_m l'angle entre l'axe longitudinal de la pièce mobile et celui inter

polaire de la pièce fixe. Une telle structure possède deux positions rotoriques remarquables : Une position montrée dans la Fig. I.13- a dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance maximale, ou une inductance minimale, appelée position d'opposition.

Une position illustrée par la Fig. I.13-b dans laquelle le circuit magnétique présente une réluctance minimale, ou une inductance maximale appelée position de conjonction

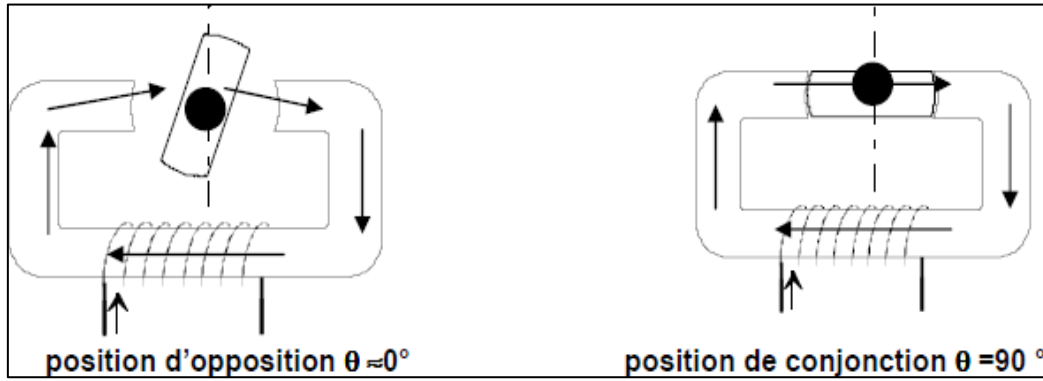


Figure I-13 : Structure de la MRV de base et positions extrêmes du rotor.

Si le système se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction, et que l'on impose un courant dans l'enroulement d'excitation, le système évolue de façon à présenter une réluctance minimale (un flux maximal) entraînant le rotor vers une position (stable) de conjonction. Si l'énergie cinétique emmagasinée durant cette phase est suffisante, une fois le courant est coupé, pour assurer la rotation du rotor jusqu'à une position d'opposition, il est alors possible de répéter le cycle afin d'obtenir un mouvement de rotation continu. En alimentant le bobinage relativement à la position, on obtient alors un fonctionnement autopiloté synchrone [7]. Dans l'exemple utilisé pour la description du principe, il apparaît que le système présente, pour un tour mécanique deux fois la même géométrie, on peut donc définir, pour une machine possédant deux dents rotoriques, l'angle électrique : $\theta_e = 2 \cdot \theta_m$ (I.1)

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est $T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m}$ (I.2)

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

- Moteur ($T_e > 0$) sur la phase croissante de l'inductance $\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} > 0$ (I.3)

- Générateur ($T_e < 0$) sur la phase décroissante de l'inductance $\frac{\partial L(\theta_m)}{\partial \theta_m} < 0$ (I.4)

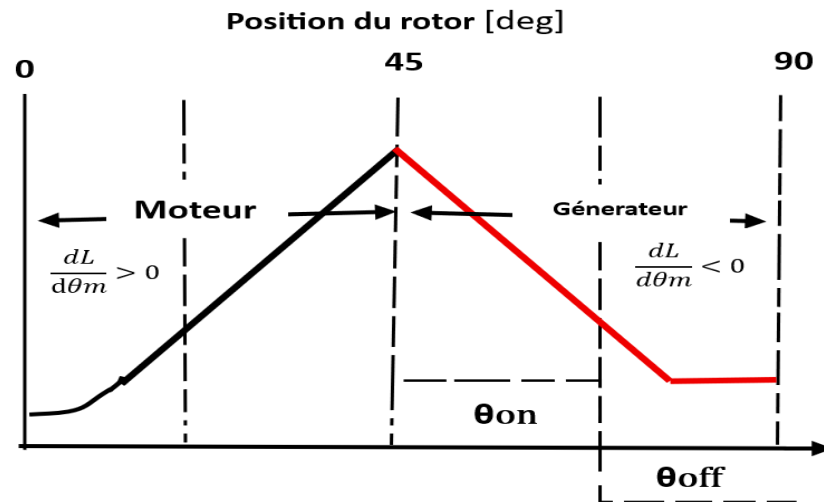


Figure I-14 : variation de l'inductance en fonction de la position du rotor.

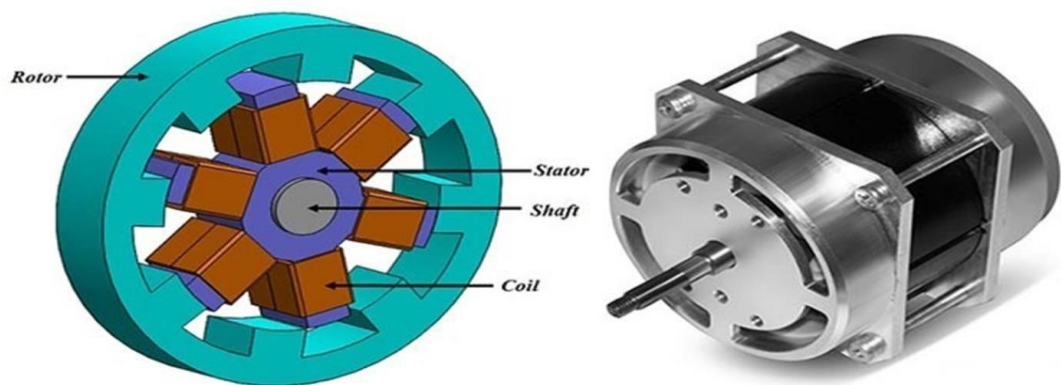


Figure I-15 : Structure électromagnétique d'une MRV 8/6

Lorsque le rotor est situé entre la position d'opposition et celle de conjonction, l'application d'un courant dans l'enroulement d'excitation modifie l'équilibre du système, qui cherche alors à minimiser sa réluctance (maximiser le flux magnétique). Cela provoque une rotation du rotor vers la position de conjonction. Si, après coupure du courant, l'énergie cinétique accumulée suffit à entraîner le rotor jusqu'à la prochaine position d'opposition, le cycle peut se répéter, assurant ainsi une rotation continue [4].

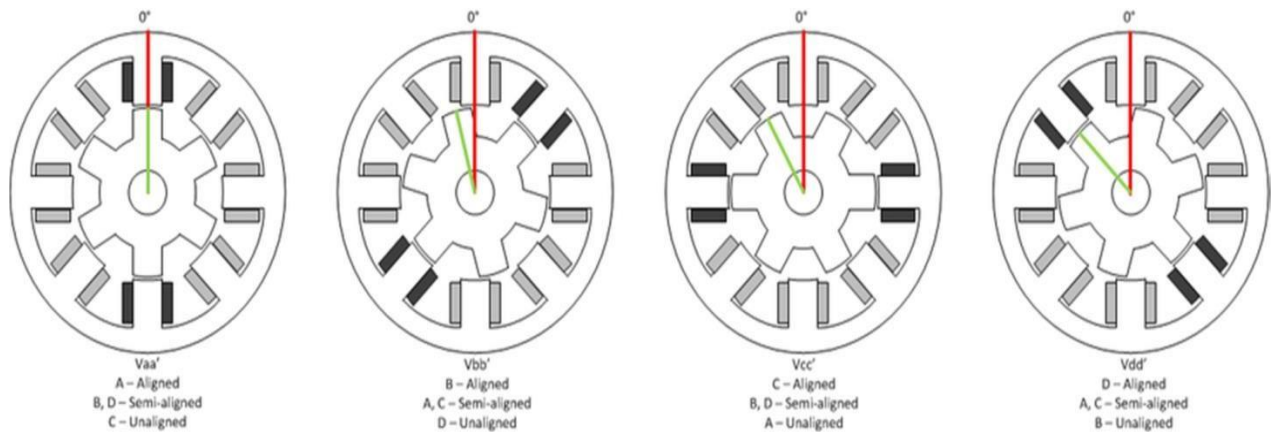


Figure I-16 : Positions d'opposition et de conjunction d'une MRV 8/6

La période de variation de la réluctance vue d'une phase correspond au passage de la conjunction d'une dent à la conjunction de la dent suivante. La relation entre les angles électrique θ_e et mécanique θ_m est donnée par : $\theta_e = N_r \cdot \theta_m$

I.9.2 Caractéristique Couple-vitesse

Le plan couple-vitesse est limité par des contraintes physiques ; soient la tension d'alimentation et réchauffement de la machine. Cependant, dans ces limitations, le moteur à reluctance variable n'est pas différent des autres machines électriques tournantes où la vitesse et le couple sont limités respectivement par la tension d'alimentation et par le courant maximal dans leurs enroulements. La figure I.17 montre la caractéristique couple vitesse d'un MRV.

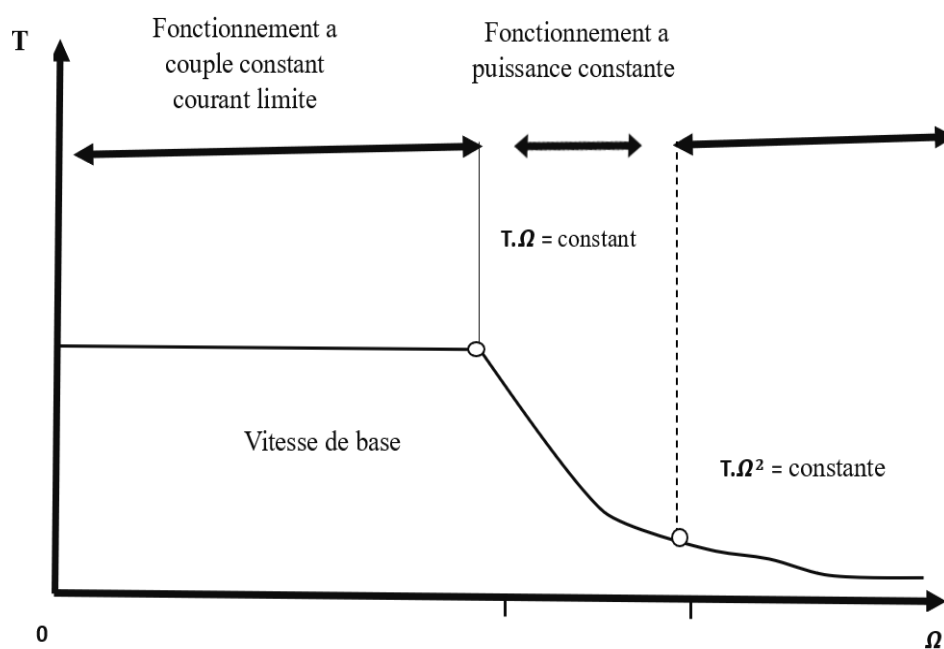


Figure I-17 : Caractéristique couple vitesse d'un moteur à reluctance variable

Le moteur fonctionne à couple constant jusqu'à la vitesse de base (nominale). Après, il passe au régime à puissance constante à cause de la limitation de courant par la force contre-électromotrice. Le couple est inversement proportionnel à la vitesse de rotation. Dans les hautes vitesses, la force Contre électromotrice croît et la puissance sur l'arbre diminue. Dans ce régime de fonctionnement, le couple est inversement proportionnel au carré de la vitesse [11].

I.10 Différents types de la MRV

Les structures de MRV sont très variées et l'imagination des ingénieurs et chercheurs n'a guère eu de limites. Il est utile de préciser de quel type de machine à réluctance variable on parle. Deux structures retiennent plus particulièrement l'attention à l'heure actuelle parce qu'elles présentent une grande simplicité de construction et donc des possibilités de réduction de coût. Ce sont des machines dites « synchrones à réluctance » (Synchronous Reluctance Machines dans la littérature anglo-saxonne) et les MRV à double saillance–MRVDS- (switched reluctance machines), où dans les deux cas le rotor est denté à N_r dents identiques et régulièrement réparties [12], [17], [19].

I.10.1 Machine synchrone à réluctance à stator lisse

Les machines synchrones à réluctance variable possèdent un stator cylindrique avec des encoches pour les conducteurs et des enroulements triphasés alimentés en courant alternatif. Le rotor, quant à lui, est anisotrope avec des chemins de réluctance variables, permettant de produire un couple par alignement des axes de faible réluctance avec le champ statorique. Cette machine se distingue par sa simplicité, son coût réduit et sa robustesse. Elle est bien adaptée aux applications nécessitant un bon rendement et un entretien minimal.

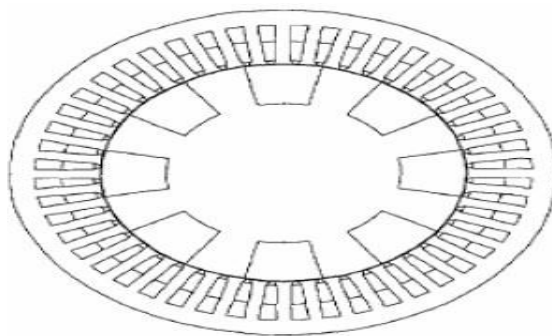


Figure I-18 : Machine synchrone à réluctance variable à stator lisse

I.10.2 MRV double denture

Ce sont des machines dont le stator ne peut être comparé à un stator lisse, vu l'importance de l'ouverture de ses encoches relativement à la denture rotorique, les irrégularités locales dues au positionnement relatif des dents rotoriques et statoriques sont d'ailleurs la cause de la conversion d'énergie [20], La Figure. I.19 représente une machine à réluctance variable à double denture avec six pôles statoriques et quatre pôles rotoriques, il ne comporte ni conducteur rotorique ni aimant, ce qui lui confère une grande robustesse et une extrême simplicité [20].

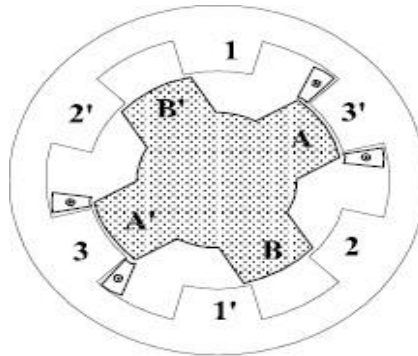


Figure I-19 : Machine à double denture.

I.11 Différentes topologies de la MRV

En électrotechnique, il a été convenu de classer les machines électriques selon le type d'énergie électrique (continu ou alternative). Mais cela n'empêche pas que certaines classifications prennent en considération la géométrie, le type de mouvement (linéaire, rotatif ou combiné) ...etc. En menant notre recherche bibliographique, nous avons constaté que les MRV ne se plient pas à une classification évidente. En effet, pour la même géométrie, ils peuvent fonctionner avec de l'énergie continu comme le MRV pure à double saillance, ou avec de l'énergie alternative comme le MRV synchrone, VERNIER, hybride, ...etc.

Plusieurs configurations géométriques sont envisageables pour les MRV rotatives ; les plus usuelles sont celles qui considèrent que le nombre de pôles du stator est plus élevé que le nombre de pôles du rotor (cela n'empêche pas que dans certains cas le rotor comporte plus de dent que le stator). Le choix du nombre des dents et des phases doit se faire par rapport à l'application envisagée et aux performances souhaitées. Les critères qui peuvent influencer le choix pour une topologie particulière incluent, entre autres [18] :

- La valeur du couple et sa forme lors du démarrage, du freinage et en régime permanent.
- Le type d'alimentation (triphase, monophasé, etc.) et le circuit de commande utilisé.
- Les chemins de flux magnétique et les pertes fer produites.

Les principales configurations géométriques des MRV rotatives sont comme suit :

I.11.1 Les MRV purs

Les MRV dits "purs" possèdent une structure saillante au rotor et au stator, avec un stator "actif" où sont situés les bobinages et un rotor "passif" (sans bobinage ni aimants). Alimentés avec une tension ou un courant de forme rectangulaire (alimentation en créneaux), ils induisent des couples à caractère pulsé considéré comme inconvenient. On peut citer divers types de structures de MRV purs [7]:

- Structures à double denture à grosses dents à 2 dents par phase (figure II.20).
- Structures à double denture à grosses dents à plus de 2 dents par phase.
- Structures à pôles statoriques dentés (« petites dents ») où plusieurs dents sont excitées à la fois par un bobinage : on parle de « bobinage global ».



Figure I-20 : MRV pur à grosses dents

I.11.2 Les MRV à effet vernier

Les MRV à effet vernier possèdent des structures identiques aux MRV purs sauf qu'ils ont des enroulements repartis et sont alimentés en courant alternatif sinusoïdal et non en créneaux. Il existe des machines dites « Vernier à grand nombre de dents », qui possèdent deux armatures saillantes (figure I.21) ; sur chaque armature, les dents sont identiques mais les nombres de dents statoriques et rotoriques ont une légère différence (similaire à celui d'une machine synchrone à rotor lisse), ce qui permet d'obtenir une perméance sinusoïdale. Il y a aussi les machines dites « Vernier à grosses dents » dans lesquelles chaque pôle statorique constitue lui-même la dent. Les nombres de pôles sont alors relativement faibles et leurs performances couple-vitesse peuvent être comparées à celles des machines asynchrone et synchrone à aimants avec des fréquences d'alimentation voisines.



Figure I-21 MRV à effet vernier à stator externe et interne [4]

I.11.3 Les MRV hybride

Les MRV hybrides possèdent parfois la même structure que les deux types précédents, mais en plus ils sont dotés d'aimants permanents afin d'améliorer leurs performances. L'adjonction d'aimants dans les structures à double saillance permet de compenser un entrefer trop élevé. Il y'a deux machines à aimants à double saillance dérivées des MRVDS (Machine à Réluctance Variable à Double Saillance): l'une met en œuvre des aimants placés au rotor (figure I.22), la machine se rapproche des machines synchrones à aimants enterrés (Interior Permanent Magnet); la seconde conserve le rotor passif de la MRV pure et utilise plutôt des aimants placés au stator: ce qui permet d'obtenir alors une machine à double saillance à aimants permanents statoriques (DSPMM) dite « MRV polarisée » [2].

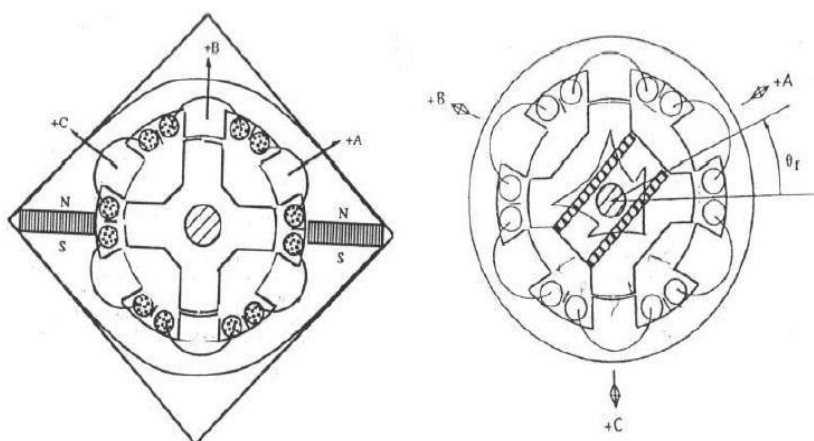


Figure I-22 Utilisation d'aimants dans les machines à double saillance

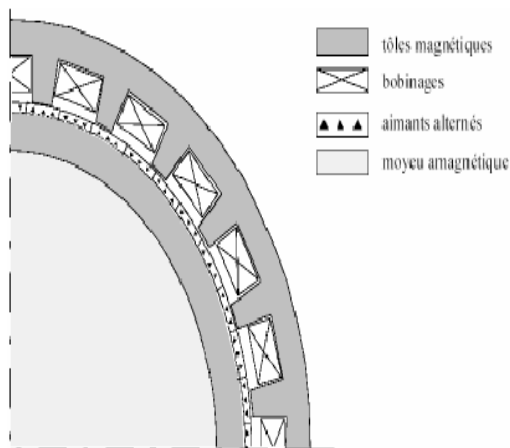


Figure I - 23: MRV hybride à effet vernier

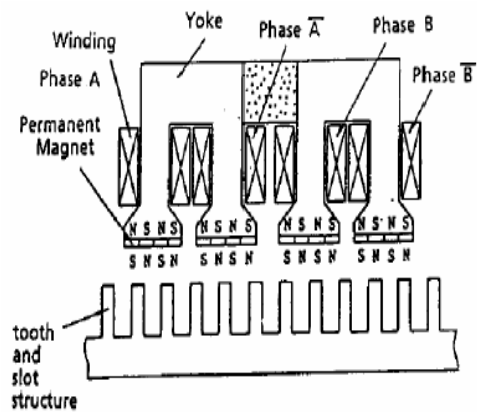


Figure I - 24 : MRV à plots aimants

II.12 Avantages et problématiques de la MRV

Les motivations principales qui rendent la MRV concurrentielle aux autres machines sont [14]-[16] :

- L'amélioration du rapport de saillance rend la MRV concurrentielle avec la machine asynchrone, en particulier en termes de facteur de puissance et puissance absorbée.
- Les petits et moyens entraînements peuvent avoir une commande plus simple en utilisant la MRV par rapport à la commande vectorielle de la machine asynchrone.
- La MRV a un fonctionnement stable aux basses vitesses et en pleine charge à la différence d'un moteur asynchrone qui peut avoir des problèmes de sur échauffement.
- La MRV n'a aucun aimant qui est un avantage par rapport à la machine à aimants permanents dans les applications à hautes températures. Par conséquent elle n'a pas de problème de désaimantation.
- Structure rotorique simple, robuste, sans bobinages ni conducteurs rotoriques ou aimants permanents. Du point de vue mécanique, le moment d'inertie d'une MRV est faible, typiquement la moitié de celui d'une machine asynchrone avec le même rayon externe du rotor. Ce qui permet une accélération élevée. Du point de vue thermique, les pertes rotoriques faibles conduisent à un simple système de refroidissement.
- Excellentes performances dans des environnements extrêmes. Elles sont souhaitables pour des applications à haute température, haute vitesse.
- Grande capacité de surcharge de courte durée. Ceci est limité seulement par la température maximale dans les bobines et la saturation magnétique des matériaux magnétiques. Par conséquent, elles peuvent produire de hauts couples de démarrage ou/et de l'accélération.

- Potentiellement, faible coût de fabrication et de maintenance, malgré l'exigence relativement élevée de la fabrication due à leurs faibles épaisseurs de l'entrefer.
- Fonctionnement dans une large plage de puissance constante. Leurs efficacités peuvent être maintenues au-delà de la vitesse de base. Par conséquent, elles ont les aptitudes pour les applications telles que les véhicules hybrides ou électriques.

Les problèmes major des MRV sont :

- L'inconvénient majeur du MRV est l'ondulation de couple, les vibrations ainsi que les bruits acoustiques relativement plus élevés que les machines asynchrones et les machines à aimants permanents. Mais il y a heureusement déjà plusieurs méthodes de compensations actives ou passives pour diminuer les vibrations et les bruits acoustiques.
- Pas de couple résiduel, c'est-à-dire que hors tension, le rotor est libre, ce qui peut être problématique pour ce genre de moteur.
- La fabrication est assez délicate, les entrefers doivent être très faibles.
- Alimentations en courant unidirectionnel est préférable dans les MRV conventionnelles, ce qui nécessite souvent des convertisseurs non-standards. Pourtant, pour différentes applications, des convertisseurs bipolaires (demi- pont ou pont complet) ont aussi vu le jour [7].
- Le bon fonctionnement à faible vitesse demande un profil complexe de l'onde du courant et des mesures précises de la position du rotor.

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté l'utilisation des moteurs électriques dans les véhicules électriques. Nous avons d'abord étudié le principe de fonctionnement des voitures électriques et des moteurs à réluctance variable. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur l'élément clé d'un VE qui sont les moteurs électriques. Parmi les moteurs qui donnent beaucoup de satisfaction figurent les moteurs à réluctance variable (MRV).

Le chapitre suivant sera consacré à la conception d'un moteur à réluctance variable 24/16 de 60 kW à l'aide du logiciel (Motorsolve) et simulation du modèle non linéaire sous Matlab/Simulink.

CHAPITRE II

CONCEPETION ET SIMULATION du MRV

24/16

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous expliquerons en détail les dimensions de chaque partie du moteur de traction utilisé dans un véhicule électrique hybride, sa conception, sa simulation et les matériaux nécessaires que nous utiliserons dans ce travail. Ces éléments seront également comparés aux dimensions d'un moteur synchrone à aimants permanents utilisé dans un véhicule électrique hybride de type Prius Toyota 2010. La conception prendra en compte la taille, le poids et les performances requis selon les spécifications nécessaires et les normes internationales. En outre, nous agirons sur la géométrie de la Machine à Réluctance Variable (MRV) afin de réduire les ondulations de couple, un facteur clé pour améliorer les performances et le confort acoustique du véhicule [7].

Un MRV de type 24/16 (24 pôles au stator et 16 pôles au rotor) est envisagé afin de reproduire les caractéristiques couple-vitesse du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) utilisé dans la Prius Toyota 2010.

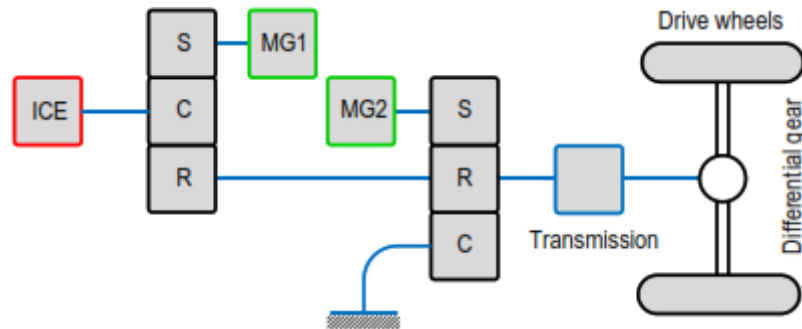
Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'élaboration d'un MRV 24/16 prenant en compte la topologie, les dimensions et la composition du moteur. Ce modèle est développé à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF) dans le régime magnétodynamique, en utilisant le logiciel MotorSolve. La MEF repose sur une résolution numérique des équations de Maxwell, offrant des simulations d'une grande précision. Ces dernières permettent d'intégrer la géométrie complexe du moteur, de modéliser l'effet de saturation des matériaux magnétiques et de tenir compte des caractéristiques non linéaires [15]. Par ailleurs, ce chapitre mettra un accent particulier sur la modification des paramètres géométriques afin d'optimiser les performances du moteur, notamment en réduisant les ondulations de couple et en améliorant son comportement global. Par suite des données magnétique fournies par le logiciel sont destinées pour la création des tableaux look up table pour la simulation de la MRV sous MATLAB SIMULINK.

II.2 Système transmission hybride de Toyota Prius 2010

Les véhicules électriques hybrides (HEV) associent un groupe motopropulseur basé sur un moteur à combustion interne classique à une propulsion électrique. Dans le cas de la Toyota Prius 2010, le système comprend deux MSAP conçus pour optimiser l'efficacité énergétique : le moteur de démarreur-générateur (MG1) et le moteur de traction (MG2), qui propulse directement le véhicule [4].

De plus, un second ensemble d'engrenages planétaires de réduction est placé entre le moteur et l'arbre de sortie de la transmission, comme indiqué à la Figure II-1. Ce mémoire vise à substituer le moteur synchrone à aimants permanents (MG2) par un MRV Offrant des performances

équivalentes.



S: Sun gear

transmission C: Carrier

R : Ring

ICE : Moteur à combustion interne

MG1 : Démarreur moteur, générateur

MG2 : Moteur de traction

Figure II-1 : Schéma de système de transmission hybride Toyota Prius 2010 [6].

II.3 Bloc batterie HV dans Toyota Prius 2010

La Toyota Prius 2010 contient une batterie Lithium-ion (Li-ion) haute tension qui alimente le moteur électrique MG2, ainsi que l'onduleur/convertisseur. Le bloc de batterie HV est placé dans un boîtier métallique monté de manière rigide sur la traverse du plancher du coffre, derrière le siège arrière. Ce boîtier est isolé de la haute tension et dissimulé sous le tapis de l'habitacle pour garantir la sécurité des occupants [7].

Le bloc de batterie HV est composé de 96 cellules de batterie Li-ion basse tension (3,6 volts) connectées en série, produisant environ 346 volts. Chaque cellule est étanche et enfermée dans un boîtier scellé. L'électrolyte utilisé, un solvant organique contenant du lithium-ion, est absorbé dans l'électrode et ne risque pas de fuir, même en cas de collision [6].

Pour maximiser l'efficacité énergétique, l'onduleur/convertisseur de la Prius contient un circuit de boostage qui élève la tension de la batterie HV de 346 volts à 650 volts en courant continu. Cet onduleur convertit ensuite la tension en courant alternatif triphasé pour alimenter le moteur de traction MG2. Par ailleurs, de nombreuses protections ont été intégrées pour garantir que la batterie HV reste en sécurité, notamment en cas d'accident [6].



Figure II - 2 : Batterie Lithium-ion (Li-ion) à haute tension

II.4 Conception du MRV 24/16

Un MRV 24/16 est conçu, analysé et étudié en tant que modèle standard. En appliquant diverses modifications à la forme géométrique du rotor et du stator dans l'environnement de simulation du logiciel MotorSolve, les performances du moteur sont optimisées pour réduire les ondulations de couple et améliorer le couple de sortie.

Le MRV ou SRM (Switch Reluctance Motor) construit est de 24 pôles au stator et 16 pôles au rotor de trois phases, ce moteur est alimenté par une source de tension continue de 650 V et un courant de 240A, la vitesse nominale du moteur est de 2800 tr/ min. Le MRV 24/16 en cours de conception doit respecter les caractéristiques couple-vitesse ainsi que le diamètre extérieur (264 mm), et la longueur axiale (108 mm) du stator du MSAP.

II.4.1 Paramètre nominale du moteur

Les paramètres géométriques du moteur influencent directement ses performances électromagnétiques et mécaniques[11]. Ce tableau met en évidence les variations apportées pour optimiser l'efficacité et la fiabilité du système.

Tableau II - 1 : Paramètres électrique et mécanique du MRV 24/16 [11]

Couple (N.m)	207
Puissance de sortie (KW)	60
Efficacité énergétique	88.8
Tension DC (V)	650
Courant nominale (A)	240

Tableau II-2 : Paramètres géométrique du MRV 24/16

Paramètres	Dimensions
Nombre de pôles du stator	24
Largeur axiale	108mm
Diamètre extérieur du stator [mm]	264 mm
Diamètre intérieur du stator [mm]	160 mm
Hauteur des pôles du stator [mm]	24.7 mm
Arc polaire du stator [deg]	8.8 °
Largeur de culasse du stator[mm]	22.3 mm
Facteur de remplissage de fente [%]	0.54 %
Nombre de spires	11
Epaisseur d'entrefer [mm]	0.5 mm
Nombre de pôles du rotor	16
Diamètre extérieur du rotor[mm]	160 mm
Diamètre intérieur du rotor[mm]	52 mm
Hauteur des pôles du rotor [mm]	15.5 mm
Arc polaire du rotor [deg]	7.4 °
Largeur de culasse du rotor [mm]	43 mm
Acier	M19 -29 Ga

Le moteur MG2 a une puissance nominale de 60 kW, un couple nominal de 207 Nm et une vitesse de rotation maximale de 10000 tr/min à vide et de 2800 tr/min en charge nominale. On note à travers la comparaison entre le MSAP et MRV 24/16 que le moteur MSAP peut être remplacé par le moteur MRV 24/16, notamment en termes de taille, de performance et de rendement électrique.

Tableau II - 3 : Comparaison entre IPMSM et MRV [11]

Moteur Critère	MSAP	MRV 24/16
Diamètre extérieur du stator	264 mm	264 mm
Longueur axiale	108 mm	108 mm
Epaisseur d'entrefer	0.8 mm	0.5 mm
Nombre de spires	12	11
Facteur de remplissage	54	54
Tension d'alimentation DC	650 v	650v
Courant nominal DC	240 A	240A
Le couple maximale	207 N.m	207 N.m

II.4.2 Spécifications des matériaux du MRV 24/16

Les matériaux utilisés dans le moteur affectent les caractéristiques du moteur telles que le poids, la température de fonctionnement et divers changements climatiques qui peuvent affecter le fonctionnement du moteur, il est donc essentiel de choisir les matériaux qui conviennent à la nature et garantir une durée de vie plus longue et un bon fonctionnement.

Tableau II - 4 : Matériaux utilisés dans le MRV 24/16

Description	Matériau
Stator	M_19 29 Ga
Rotor	M_19 29 Ga
fil de bobinage	cuivre : 100 %
Matériau isolant dans le stator	résine époxy

II.4.3 Exploitation des résultats de conception du « MRV »

En exploitant logiciel MotorSolve qui nous permet de tracer les différentes caractéristiques de la machine étudiée. Le MRV peut être conçu en créant un nouveau projet sous la carte moteur SRM, Lors de l'ouverture de MotorSolve, l'interface graphique affiche trois fenêtres, les fenêtres (**Motors explorer panel**) et (**Inputs**), qui sont en cascade sur la gauche de la fenêtre (**View window**), qui peut être fait pour afficher le modèle 2D ou 3D de moteur sur la droite.

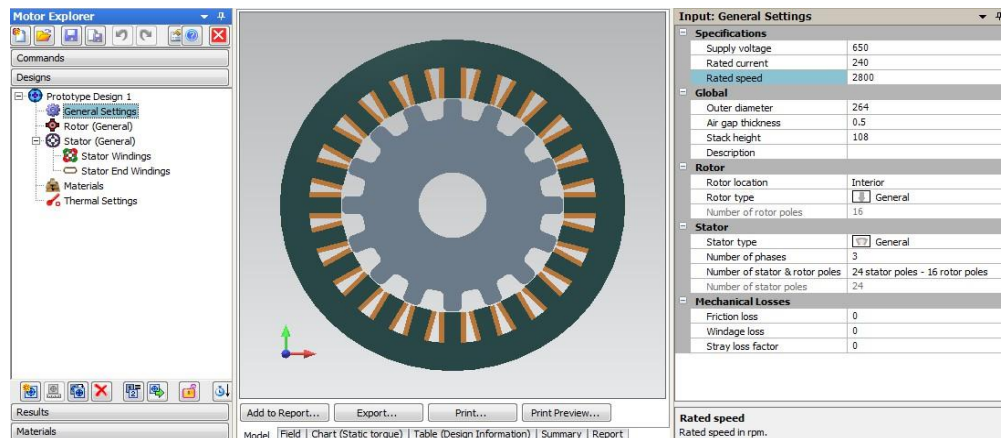


Figure II - 3 : Modèle de moteur à réluctance variable dans logiciel MotorSolve.

La figure II.4 montre les données globales de la MRV 24/16 étudiée.

Input: General Settings	
Specifications	
Supply voltage	650
Rated current	240
Rated speed	2800
Global	
Outer diameter	264
Air gap thickness	0.5
Stack height	108
Description	
Rotor	
Rotor location	Interior
Rotor type	General
Number of rotor poles	16
Stator	
Stator type	General
Number of phases	3
Number of stator & rotor poles	24 stator poles - 16 rotor poles
Number of stator poles	24
Mechanical Losses	
Friction loss	0
Windage loss	0
Stray loss factor	0

Figure II - 4 : Les données globales du MRV 24/16 étudié sous MotorSolve.

Dans cette étude nous allons dimensionner et simuler notre moteur MRV 24/16 via le logiciel MotorSolve par analyse en 2D ou 3D.

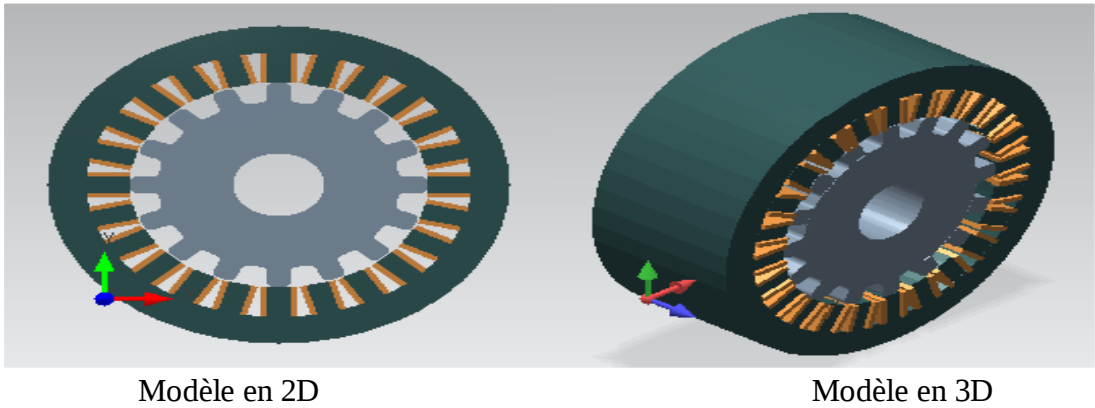


Figure II - 5 : Modèle final du MRV 24/16 sous MotorSolve

Dans l'onglet **Stator** et **Rotor**, spécifiez le diamètre intérieur et extérieur, la largeur de l'ouverture ainsi que l'angle et le rayon de la dent. Comme indiqué sur la Figure II.6.

Input: Stator (General)	Input: Rotor (General)
Diameters Inner diameter 170 Outer diameter 264	Diameters Inner diameter 52 Outer diameter 169
Coils Coil angle 90.2 Coil bottom width 3.77 Coil length 24.4	Core Core thickness 43
Teeth Bifurcation radius 0 Slot depth 24.7 Stator pole angle 8.8 Tooth angle 90	Teeth Bifurcation radius 0 Rotor pole angle 9.5 Tooth angle 90
Fillets Bottom fillet radius 0 Tooth tang radius 0	Fillets Pole bottom radius 4 Pole tip radius 4
Viewing Options Stator core transparency 50 Stator winding transparency 50	Viewing Options Rotor core transparency 50
Paramètre du rotor A	Paramètre du rotor B

Figure II - 6 : Paramètres du stator et rotor du MRV 24/16

Et à la fin et après avoir terminé le processus de conception, le logiciel MotorSolve nous permet voir tous les résultats à partir de l'onglet '**Results**', y compris les graphes d'analyse de mouvement, à savoir les courants, le couple, la puissance d'entrée / sortie, et le flux inductances et toutes les pertes pour une ou toutes les phases, comme indique sur la figure.II.7

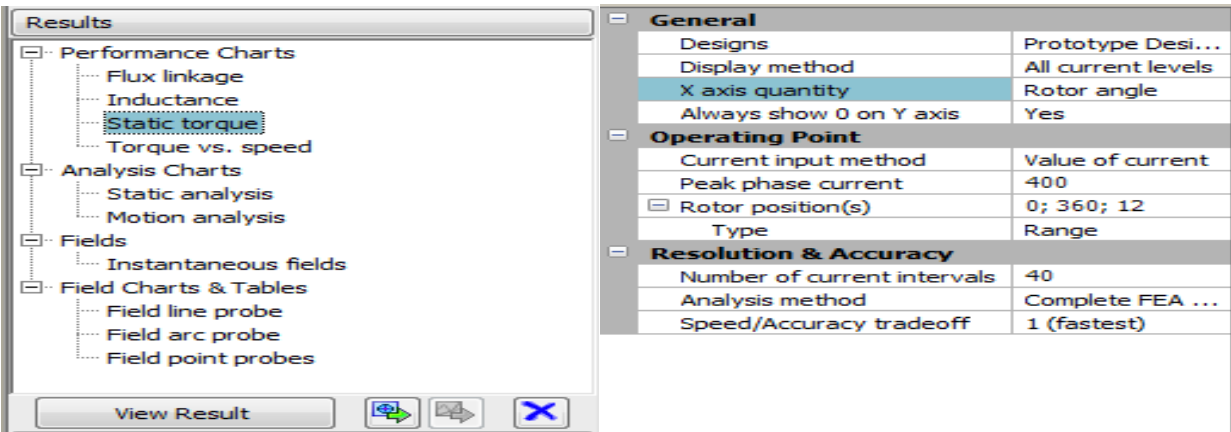


Figure II - 7 : Page des résultats

Le choix des matériaux est aussi disponible dans MotorSolve dans l'onglet '**Materials**', le matériau choisi pour les conducteurs et de type cuivre (**Copper : 100%IACS**) et pour le fer de stator ainsi que le rotor (M-19 29 Ga), comme illustré dans la figure II.8

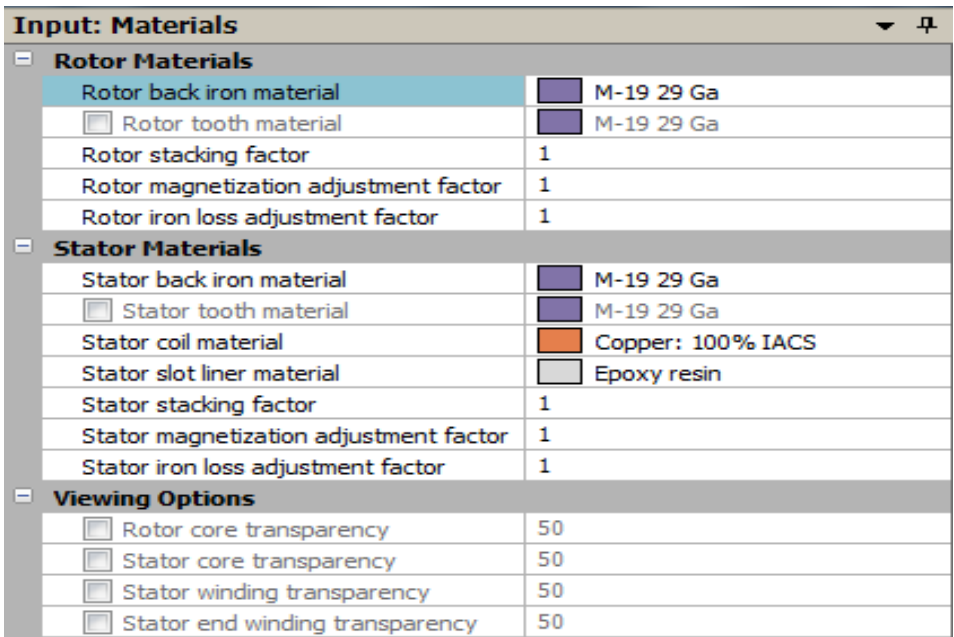


Figure II - 8 : Matériaux du noyau des composants du moteur

II.5 Analyse des variations géométriques du MRV 24/16 en vue de l'optimisation des performances

II.5.1 Analyse de conception de MRV

Les spécifications suggèrent une puissance nominale d'environ 60 kW à un couple de 207Nm et pour une vitesse de 2800 tr/min. Le cahier des charges comprend non seulement des exigences, mais également des contraintes sur le volume, le matériau utilisé, etc.

Le diamètre du stator : $D_s = 264$ mm

$$\frac{L}{D_r} < 1 \quad (\text{II.1})$$

D_r : le diamètre extérieur du rotor et L : la longueur axiale de la machine

Les informations dont nous disposons incluent le couple nominal et la puissance nominale, qui sont des points de départ possibles pour la conception du moteur électrique [13].

Tous les calculs de conception commencent par l'équation de couple :

$$T = K \cdot D_r^2 \cdot L \quad (\text{II.2})$$

Où D_r est le diamètre extérieur du rotor, L la longueur de la machine et K le coefficient de sortie. K représente le produit des charges électriques et magnétiques. Deux autres coefficients liés à K sont le couple par unité de volume de rotor TRV, et la contrainte de cisaillement de l'entrefer σ . La signification de la TRV est suggérée par son nom, tandis que σ représente la pression à la surface du rotor. Les coefficients sont exprimés par les équations suivantes [13];

$$\text{TRV} = \frac{T}{\frac{\pi}{4} D_r^2 \cdot L} \quad (\text{II.3})$$

$$\sigma = \frac{T}{\frac{\pi}{2} D_r^2 \cdot L} \quad (\text{II.4})$$

Les trois paramètres sont étroitement liés, de sorte que chacun d'entre eux peut être sélectionné pour déterminer la taille du moteur électrique.

II.5.2 Diamètre du rotor

T. Miller [20] a fourni quelques rapports recommandés entre le diamètre du rotor (D_r) et le diamètre du stator (D_s) pour chacune des topologies décrites ci-dessus. Les rapports recommandés sont présentés dans le Tableau II.2 et sur la base de ces rapports, les diamètres respectifs des rotors sont calculés en considérant que D_s est de 264 mm [20].

Tableau II - 5 : Rapport recommande entre le diamètre du rotor et le diamètre du stator [18]

Topologies	3-PHASE 6/4	3-PHASE 12/8	4-PHASE 8/6	3-PHASE 18/12	3-PHASE 24/16
Dr/Ds	0.5	0.57	0.53	0.62	0.52

Le choix d'un rapport approprié dépend du nombre de pôles de stator et de rotor et des exigences de fonctionnement. L'objectif de ce mémoire est de concevoir un moteur MRV 24/16 simple couche ($N_s=24$, $N_r=16$) avec $D_r=160$ mm.

II.5.3 Longueur de l'entrefer "air gap length"

Le MRV nécessite un intervalle d'air uniforme et une bonne concentricité pour minimiser l'ondulation de couple et le bruit acoustique. La réluctance magnétique de la culasse étant faible comparée à celle de l'entrefer, la longueur de l'entrefer détermine le couple de sortie et le besoin en volt-ampère dans l'entraînement du moteur. Cependant, l'entrefer ne peut pas être réduit au maximum en raison de contraintes de fabrication et il est approximativement proportionnel à la taille du moteur. Par exemple, étant donné que le rapport L/D_r est égal à 1, la longueur de l'entrefer est égale à 0,5% du diamètre du rotor [13]. Pour un moteur de la taille indiquée, il est raisonnable de supposer que la longueur de l'entrefer g est de 0,5 mm, pour des raisons de calcul on prend $g=1$ mm. [13]

II.5.4 Arcs de pôles

Les plages des arcs de pôles, qui seront utilisées pour limiter l'espace de conception pendant la phase d'optimisation, doivent être discutées. Deux critères principaux guident la sélection de l'arc de pôle. Le premier consiste à s'assurer que le moteur répond à l'exigence de démarrage automatique, et le second consiste à obtenir une forme d'onde couple / position avec ondulation minimale [17]. En fait, ces exigences imposent des limites supérieure et inférieure aux arcs de pôles de stator et de rotor, vérifiant les conditions citées auparavant on obtient [18] :

- L'ouverture de la dent (pole) rotorique $\beta_r=9,5^\circ$
- L'ouverture de la dent (pole) statorique $\beta_s=8,8^\circ$

Les conceptions pratiques doivent toujours avoir $\beta_r \geq \beta_s$ [13]. Le déphasage entre deux phases successives du stator correspond à l'angle de pas mentionné dans l'équation

$$\theta_{rs} = \varepsilon = \frac{2\pi}{N_r} \frac{4}{N_s} \quad (\text{II.5})$$

Où N_r et N_s sont les nombres de pôles (des dents) de rotor et de stator

Considérant les contraintes de conception, de fabrication et de performance, et pour éviter tout Chevauchement entre les pôles du stator et du rotor en position non alignée, la séparation angulaire entre les pôles du rotor adjacents doit être supérieure à celle de l'arc de pôle du stator. Sinon, le couple de démarrage sera très faible. Sur la base de ce principe, nous avons obtenu la condition (II.6) :

$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r \geq \beta_s \quad (\text{II.6})$$

Les arcs de pôles du rotor et du stator déterminent le rapport d'inductance alignée / l'inductance non alignée, et renforcent la génération de couple. Une fois les arcs de pôles fixés, les largeurs des dents stator et des dents rotor w_r et w_s peuvent être calculées en utilisant les équations suivantes :

$$w_r = 2R_r \cdot \sin \frac{B_r}{2} = 13.24 \text{ mm} \quad (\text{II.7})$$

$$w_s = 2(R_r + g) \cdot \sin \frac{B_s}{2} = 12.35 \quad (\text{II.8})$$

II.5.5 Largeur de la culasse "yoke width"

La culasse du rotor doit pouvoir supporter le flux de pointe sans saturation. En d'autres termes, la saturation ne devrait se produire qu'aux pôles du rotor. Dans un MRV à excitation simple, le flux se divise en deux parties égales après avoir quitté le pôle du rotor. Par conséquent, l'épaisseur de la culasse y_r doit être au moins égale à la moitié de la largeur du rotor w_r 2.

Comme Les MRVs pratiques fonctionnent avec leur matériau saturé, une marge est également ajoutée pour éviter une saturation localisée (y_r soit généralement 20 à 40% de plus que w_r 2 [13]). La valeur recommandée pour la largeur de la culasse est de 2/3 de la largeur de pôle rotorique [20], c.-à-d :

$$y_r = \frac{2}{3} w_r = 8,82 \text{ mm} \quad (\text{II.9})$$

Le choix de l'épaisseur de la culasse du stator est un problème d'optimisation avec deux objectifs contradictoires, d'une part, le MRV a une zone de pôle beaucoup plus petite, ce qui facilite la déviation du moteur lorsque la charge est lourde, cette déviation peut provoquer des vibrations et des bruits acoustiques et peut être réduite par une culasse de stator rigide. Et d'autre part, il n'est pas approprié de définir l'épaisseur de la culasse du stator comme $y_s = w_s$. Cependant, cela augmente le poids de la machine et comprime la zone de l'encoche.

Donc il est raisonnable de prendre

$$y_s = \frac{2}{3} w_s = 8,23 \text{ mm} \quad (\text{II.10})$$

II.5.6 Profondeur de l'encoche

La profondeur de l'encoche du rotor (dr) est la longueur du pôle du rotor qui est au moins 20-30 fois supérieure à l'entrefer nécessaire pour obtenir une faible inductance non alignée [20]. Mais comme le flux du pôle du stator a tendance à être dans le pôle du rotor, l'approfondissement de l'encoche du rotor n'a plus d'effet sur la réduction de l'inductance non alignée. En outre, la profondeur de l'encoche du rotor est limitée par la nécessité de maximiser le diamètre de l'arbre. (dr) est recommandée dans [25] pour être égale à la moitié de ws .

$$dr = ws/2 = 6.25 \text{ mm} \quad (\text{II.11})$$

Comme le diamètre du stator, le diamètre du rotor, l'entrefer et l'épaisseur de la culasse du stator ont déjà été déterminés, la profondeur de l'encoche du stator (ds) peut être calculée comme suit :

$$ds = \frac{1}{2} (Ds - Dr - 2(g + ys)) = 43.27 \text{ mm} \quad (\text{II.12})$$

Une profondeur d'encoche statorique élevée augmente la surface d'encoche, permettant ainsi une réduction des pertes en cuivre.

II.5.7 Diamètre de l'arbre

En calculant la profondeur de l'encoche du rotor et la largeur de la culasse du rotor, le diamètre de l'arbre (Dsh) est alors donné par l'équation. (II.13) :

$$Dsh = Dr - 2(dr + yr) = 129.86 \text{ mm} \quad (\text{II.13})$$

Le diamètre de l'arbre doit être aussi grand que possible pour assurer l'intégrité mécanique et améliorer la rigidité latérale du rotor [19]. et augmenter la première vitesse critique [13].

II.6 Optimisation de la géométrie

Les modifications de la géométrie du moteur sur ses caractéristiques, notamment le couple et les ondulations de couple, sont examinées. En appliquant ces modifications, deux conceptions, nommées Modèle n° 2 et Modèle n° 3, sont simulées et analysées. Ces changements consistent à augmenter l'angle des pôles du rotor, réduire l'entrefer, allonger les pôles du rotor et diminuer l'acuité des bords des pôles. En analysant les fonctions objectives des résultats obtenus, nous sélectionnons les modèles optimaux présentant la plus forte augmentation de couple et les ondulations de couple les plus faibles. Le tableau II - 6 suivant illustre la modification appropriée à chaque fois selon la configuration de référence MRV 24 /16.

Tableau II - 6 : Valeurs spécifiées des paramètres géométriques MRV 24/16

Paramètre	Model n1	Model 2	Model n3
Diamètre extérieur(mm)	264	264	264
Epaisseur de l'entrefer(mm)	0,5	0,5	0,5
Longueur axiale (mm)	108	108	108
Largeur du culasse rotor(mm)	43	43	43
Diamètre intérieur rotor(mm)	52	52	52
Diamètre extérieur Rotor(mm)	160	160	160
Rotor Pole depth(mm)	132	132	132
Pole width tip(mm)	2	4	4
Angle du pôle du rotor (°)	7,4	8,2	9,5
Rayon de la base du pôle rotor(mm)	2	4	4
Profondeur du fer de retour du stator (mm)	24,7	24,7	24,7
Diamètre intérieur du stator (mm)	160	160	179
Angle du pôle du stator(°)	8,8	8,8	8,8
Angle de la dent du stator(°)	90	90	90

Dans le MRV, les angles des pôles du rotor et du stator sont contraints par le Triangle Faisable, limitant les configurations possibles [20]. Une série de simulations a été réalisée en faisant varier l'angle des pôles du rotor tout en maintenant celui du stator constant. L'analyse de sensibilité qui en découle repose sur l'évolution du diagramme du couple moteur.

Modèle n°2 : Optimisation des paramètres rotoriques

Ce modèle explore l'impact des modifications des paramètres rotoriques sur les performances du moteur. Les résultats de l'étude ont mis en évidence plusieurs optimisations :

Angle des pôles du rotor "Rotor pole angle" : Une augmentation de 0,8 degré, portant l'angle à 8,2 degrés, améliore la distribution du flux magnétique et réduit l'ondulation du couple.

Suppression des arêtes vives : L'élimination des arêtes vives des pôles du rotor, qui contribuent aux fluctuations du couple, a généré des résultats plus stables.

Largeur des pôles du rotor "Rotor pole width" : L'augmentation de l'extrémité des pôles de 2 mm à 4 mm permet une meilleure répartition du flux magnétique et diminue les ondulations du couple.

Rayon de la base du pôle "Pole base radius" : Son élargissement de 2 mm à 4 mm améliore la continuité du champ et réduit les concentrations de flux, optimisant ainsi les performances du moteur.

Modèle n°3 : Approfondissement des optimisations

En se basant sur les améliorations du Modèle n°2, de nouvelles modifications ont été introduites

Angle des pôles du rotor "Rotor pole angle" : Augmentation de 1,3 degré supplémentaire.

Rayon intérieur du stator "Stator inner radius" : Augmenté de 5 mm par rapport au modèle précédent et de 9 mm comparé au Modèle n°1.

II.7 Résultats d'analyse du modèle avec ‘MotorSolve’

L'étude des performances du moteur inclut l'analyse des caractéristiques suivantes : les inductances, le couple électromagnétique en fonction de la vitesse, le couple électromagnétique global, ainsi que la densité du flux dans l'entrefer, ne fois l'analyse du modèle finalisée, les résultats obtenus peuvent être visualisés en cliquant sur « Results », où les figures correspondantes sont automatiquement générées pour illustrer les performances observées.

II.7.1 Couple électromagnétique

Montre la caractéristique du couple statique de la phase 1 en fonction du courant et de position du rotor, pour des positions variantes de 0 à 12.5° et de courantes variantes de 0 à 400A par pas de 10A.

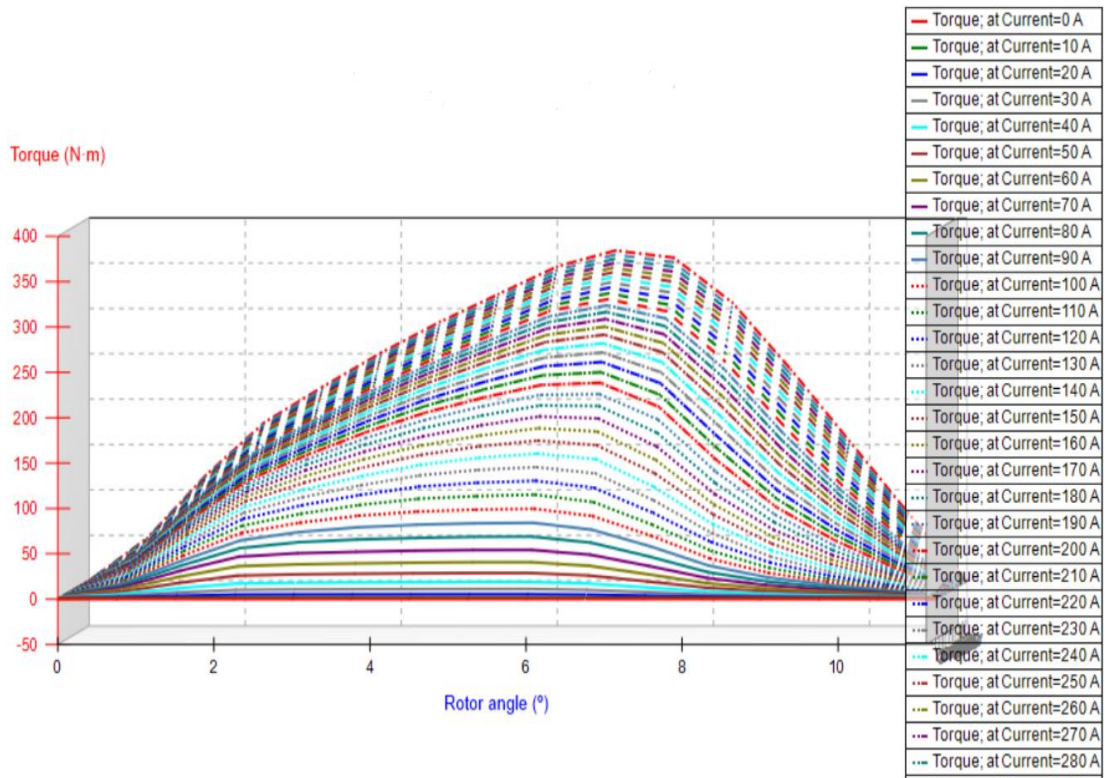


Figure II - 9 : Caractéristique de couple statique de la phase 1 en fonction de position du rotor

Après la modification des paramètres géométriques du moteur à réductance variable (MRV), la valeur du couple électromagnétique total généré atteint une valeur maximale de 260 Nm et une valeur minimale de 165 Nm. Ces ajustements géométriques ont permis de réduire significativement les ondulations de couple. Avant ces modifications, les ondulations étaient fortement observées avec une valeur minimale de 105 Nm, impactant négativement la performance globale du moteur.

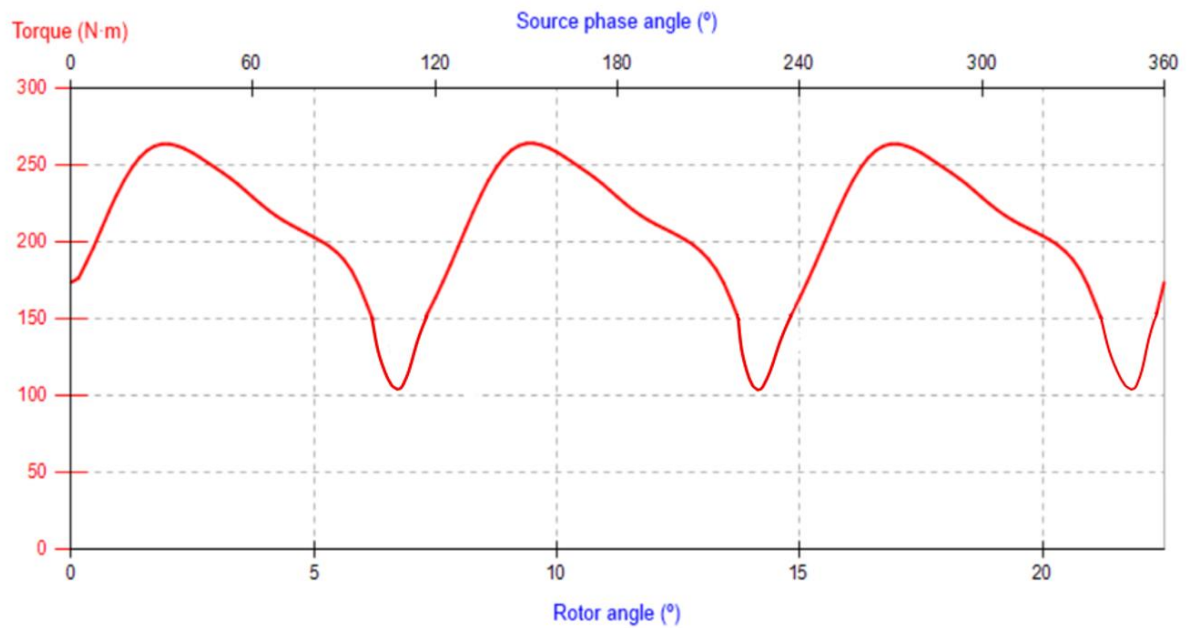


Figure II - 10 : Forme d'onde du couple électromagnétique généré de la configuration de référence

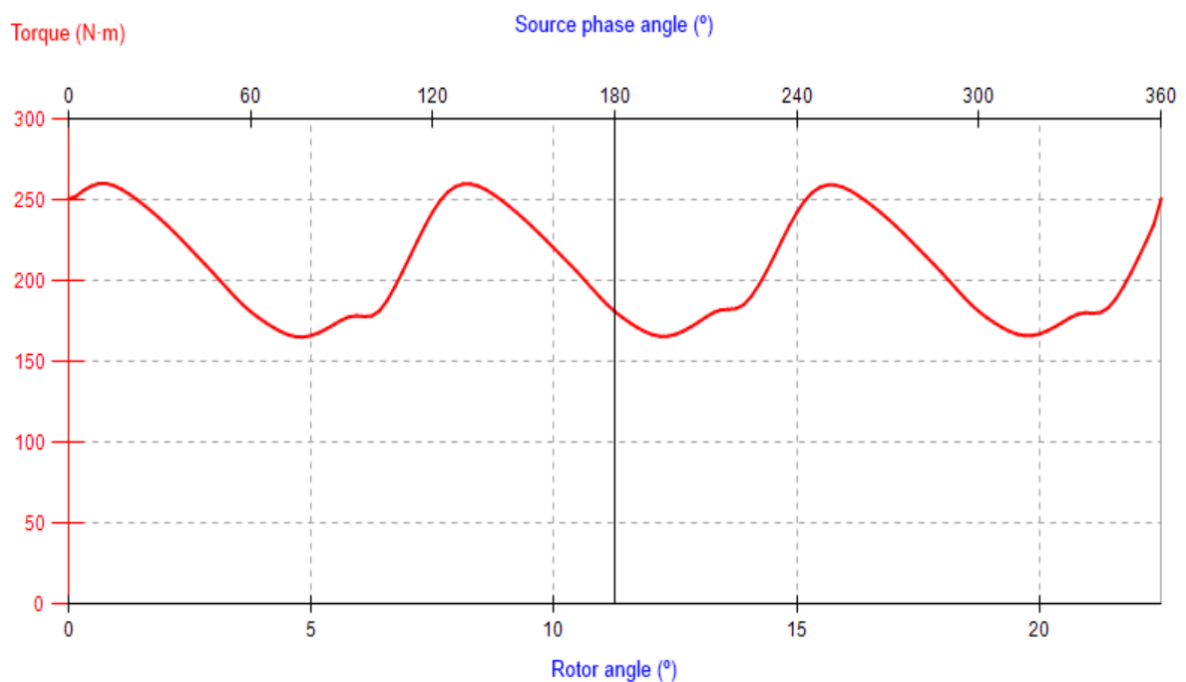


Figure II - 11 : Forme d'onde du couple électromagnétique généré du model 3

Le modèle 3 illustré dans la figure II.11 offre les meilleurs résultats en termes de réduction des ondulations de couple, Le couple minimal a été augmenter de 105 N.m à 166 N.m

Le taux d'ondulation est calculé comme suit ;

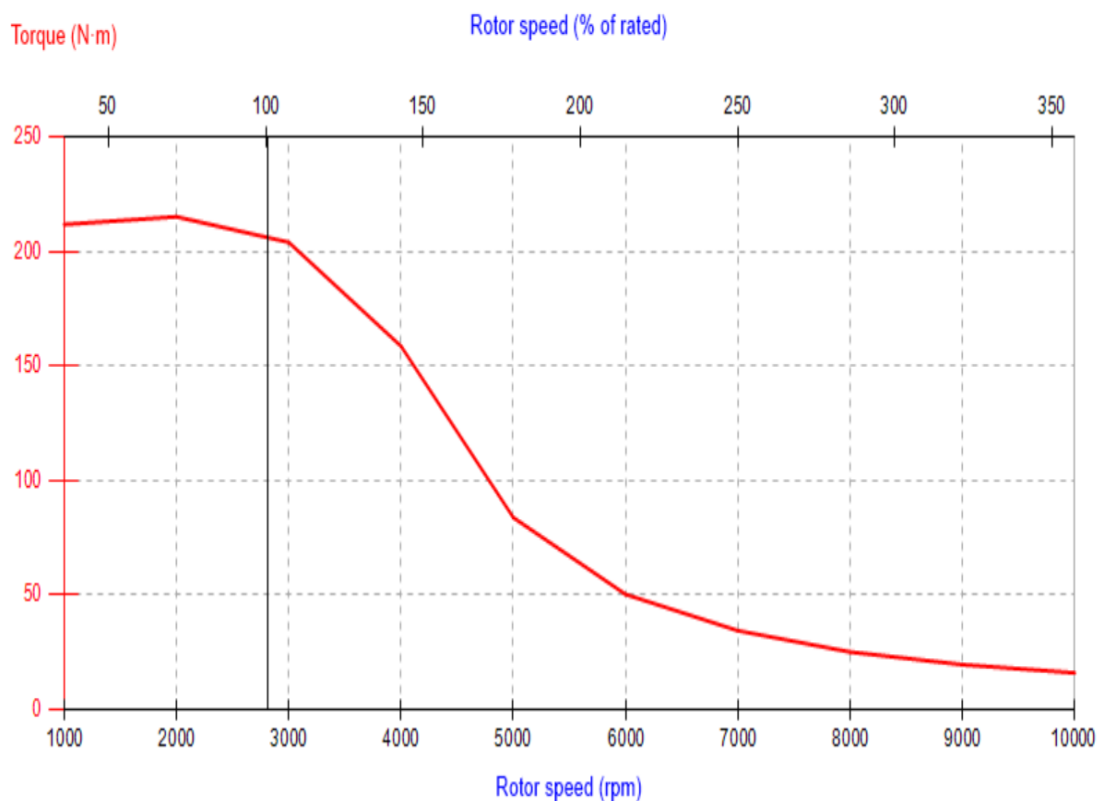
$$\text{Taux d'ondulation } \% = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{moy}}} \times 100$$

Tableau II - 7 : taux d'ondulation pour les 3 conception

Paramètre	Model 1	Model 2	Model3
Valeur maximale du couple N.m	264	264	260
Valeur minimale du couple N.m	105	130	166
Taux d'ondulation %	86.2	60.6	44.1

II.7.2 Caractéristique du couple électromagnétique-vitesse :

La figure II - 12 montrent la caractéristique du couple électromagnétique en fonction de la vitesse. Nous observons que le moteur génère un couple de 207 Nm à 2800 tr/min, avant de commencer à diminuer progressivement jusqu'à atteindre 10 Nm à 10 000 tr/min.

**Figure II - 12 : Caractéristique couple _vitesse du moteur**

II.7.3 Inductances

Les valeurs des inductances calculées par ce logiciel en fonction de la position du rotor et courant sont présentées à la figure II.13.

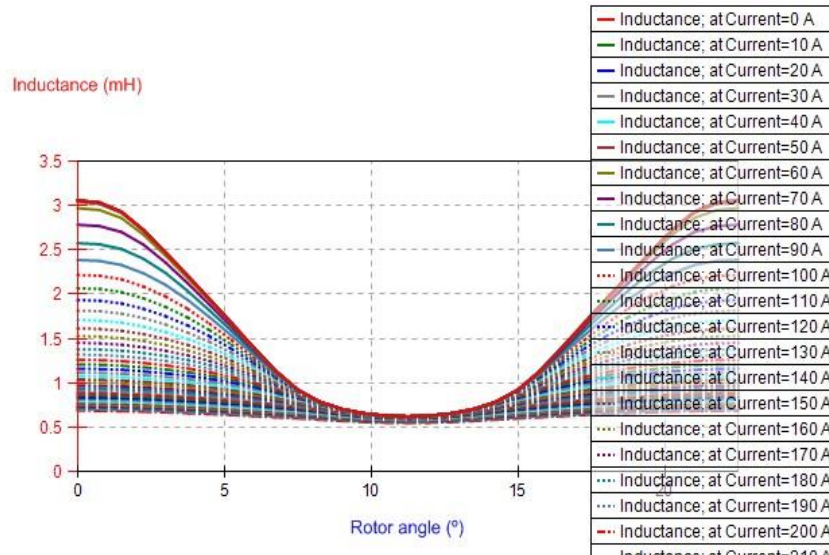


Figure II - 13 : Inductances en fonction de la position du rotor

II.7.4 Densité du flux dans l'entrefer

La caractéristique magnétique du flux en fonction du courant et de position du rotor, pour des positions variantes de 0 à 25° et des courants variantes de 0 à 400A par pas de 10A. 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 haut correspond à la position alignée.

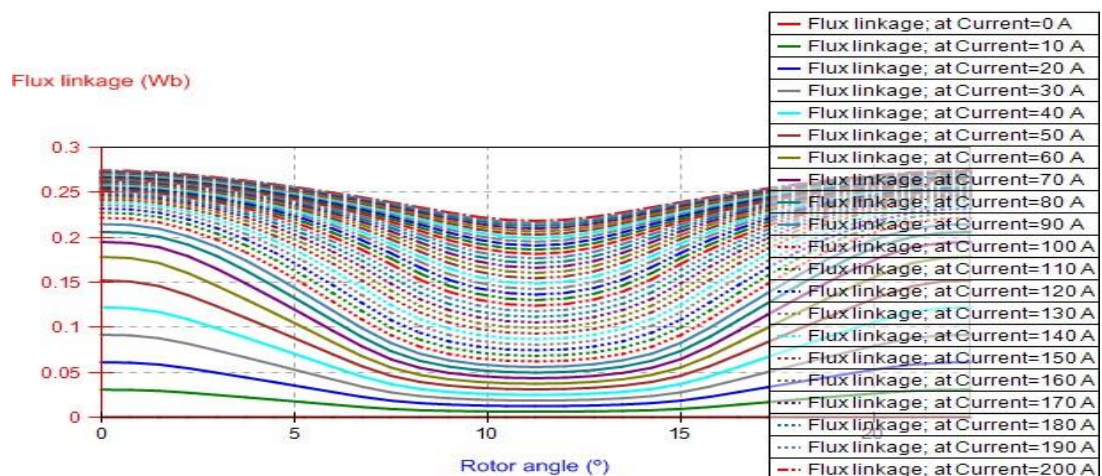


Figure II - 14 : Forme d'onde de la densité de flux dans l'entrefer

II.7.5 Les pertes

Grâce au logiciel MotorSolve, nous avons pu calculer toutes les pertes du moteur, sur un tableau simple et précis indiquant les pertes de cuivre et de fer, y compris les pertes par hystérésis et courants de Foucault. etc.

Les pertes totales générées sont de 7.71 KW, le maximum des pertes était enregistré si les pertes dans le cuivre (pertes joule) en 6.25 KW (81,06%). Comme indiqué dans le tableau II.

Tableau II - 8 : Pertes principales générées par le moteur MRV

	Prototype Design 1
Loss - Total (kW)	7.71
Loss - Winding (kW)	6.25
Loss - Stator back iron hysteresis (kW)	0.229
Loss - Stator back iron eddy current (kW)	0.258
Loss - Stator teeth hysteresis (kW)	0.295
Loss - Stator teeth eddy current (kW)	0.26
Loss - Rotor back iron hysteresis (kW)	0.069
Loss - Rotor back iron eddy current (kW)	0.0689
Loss - Rotor teeth hysteresis (kW)	0.134
Loss - Rotor teeth eddy current (kW)	0.147
Loss - Friction (kW)	0
Loss - Windage (kW)	0
Loss - Stray (kW)	0

II.7.6 Caractéristique électriques et mécaniques

Avec MotorSolve, nous avons également pu extraire les propriétés et valeurs électriques et mécaniques du modèle utilisé dans ce travail sous forme de tableau, tels que le courant, le couple, la tension, le rendement, la puissance de sortie, etc..., Notre MRV permet de réaliser l'ensemble des propriétés mécaniques et électriques de sa contrepartie (MSAP), notre moteur est également de bon rendement de 89%.

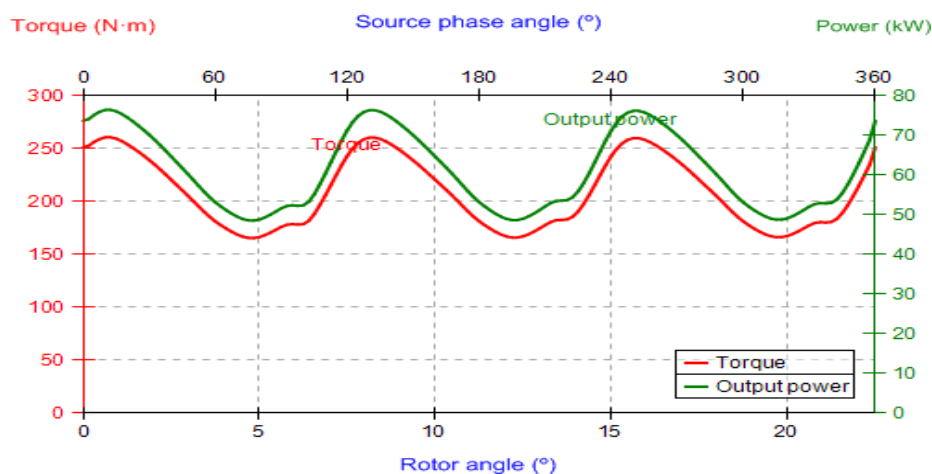


Figure II - 15 : Couple et puissance de sortie générée par le MRV.

II.8 Modèle non linéaire de la MRV

Dans Simulink, une machine à réluctance variable peut être représentée comme une combinaison d'un système électromagnétique et d'un système mécanique. La simulation peut être réalisée selon deux approches, en fonction de la nature du modèle : linéaire ou non linéaire.

La meilleure solution qui permet d'aboutir à une bonne simulation d'une machine à réluctance variable réside dans l'utilisation d'une méthodologie qui permet de prendre en compte la non-linéarité de sa caractéristique magnétique en minimisant le temps de simulation. La procédure que nous avons adoptée avec MATLAB–SIMULINK consiste d'éviter toutes les dérivées partielles qui constituent des sources d'erreurs. La technique utilise un tableau « look up table » qui approxime des relations flux / courant/position et courant /couple /position, comme montré dans la figure

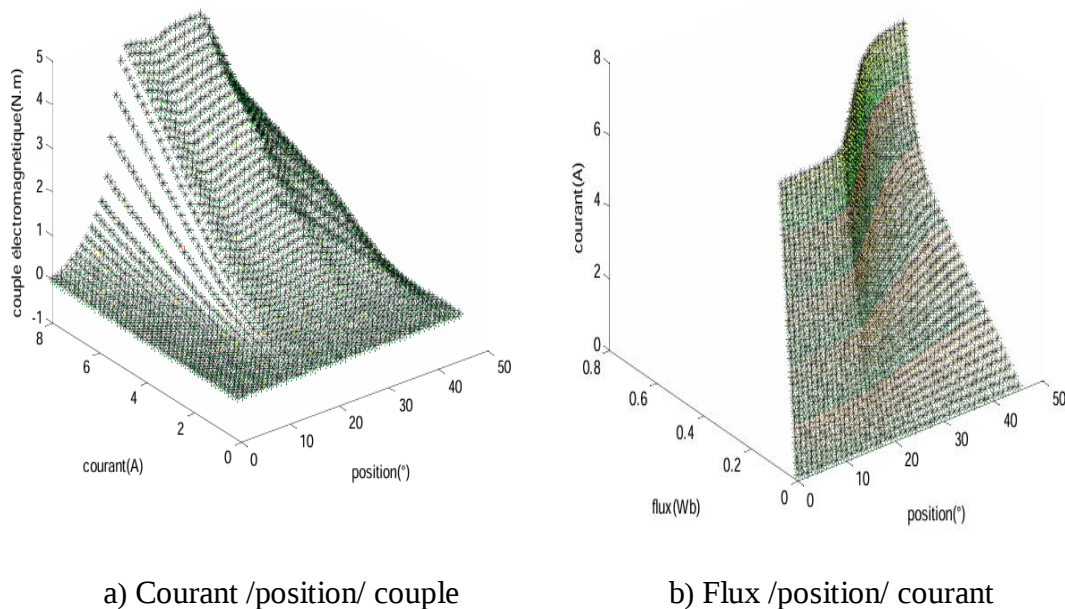


Figure II - 16 : vecteurs électromagnétiques

La machine MRV 24/16 a été modélisée en 2D magnétostatique à l'aide de la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel Motorsolve. Cet outil a fourni diverses données magnétiques essentielles à la création des tableaux « look-up table ».

La figure (II.15), montre le schéma de la phase 1. Elle montre deux tableaux « look-up-table » : flux/position/courant (tableau du courant) et courant/position/couple (tableau du couple).

Le tableau « look -up » donnant le courant de la phase I qui trouvé par une interpolation entre le vecteur du flux et le vecteur de position du rotor et le couple par interpolation entre le vecteur du courant et la position. Les blocs correspondant aux phases 2 et 3 sont similaires à la phase 1.

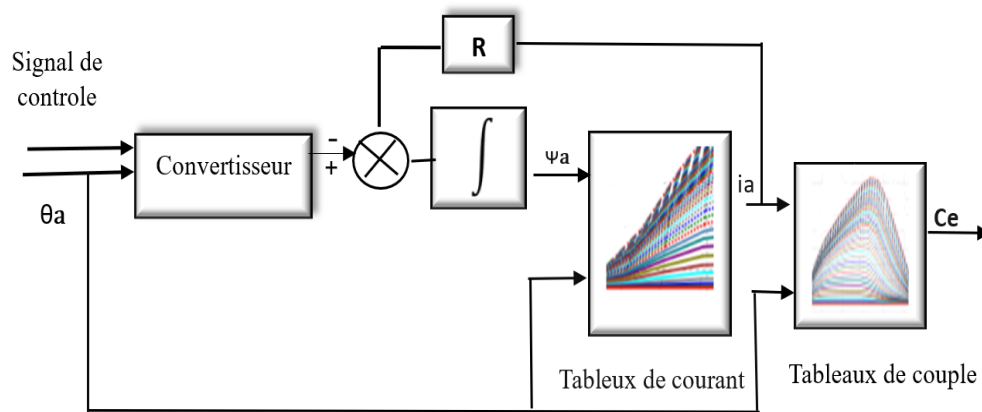


Figure II - 17: Diagramme de simulation de MRV par phase (model non linéaire) [11]

II.9 Alimentation de la MRV

La conception et le dimensionnement de la machine à réluctance variable est indissociable de leur convertisseur, En effet, les exigences imposées à la puissance pour l'application de traction électrique sont souvent celles de la simplicité et de la réduction des coûts tout en maintenant les Critères de performance, du couple et de vitesse, Il existe plusieurs topologies de convertisseurs destinés à l'alimentation des MRVs qui sont :

- ✓ Convertisseurs asymétriques
- ✓ Convertisseur de Miller
- ✓ Convertisseur a dissipation passive

Contrairement aux machines synchrones et asynchrones, le sens du couple de la machine à réluctance variable ne dépend pas du signe du courant. C'est pourquoi l'utilisation du convertisseur unidirectionnel est possible pour alimenter cette machine. La structure du convertisseur unidirectionnel la plus citée dans la littérature est la structure asymétrique à demi pont, dans laquelle un hacheur de tension alimente chaque phase. Chaque hacheur est considéré comme un bras du convertisseur composé de deux transistors et de deux diodes (roue libre ou récupération selon le type de commande des transistors). Pour une machine de "m" phases, la structure du convertisseur est représentée sur la figure II.18 [5].

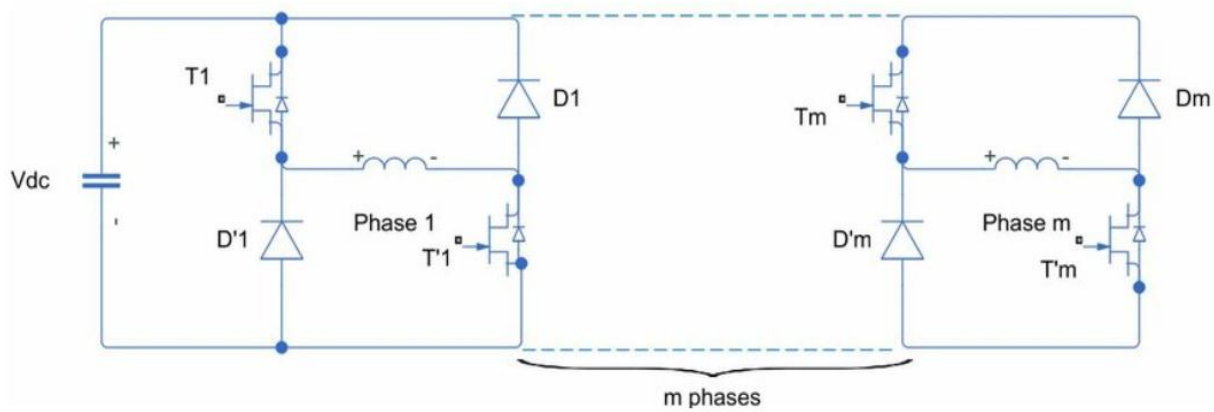


Figure II - 18: Schéma de la structure générale du convertisseur à demi-pont asymétrique[11]

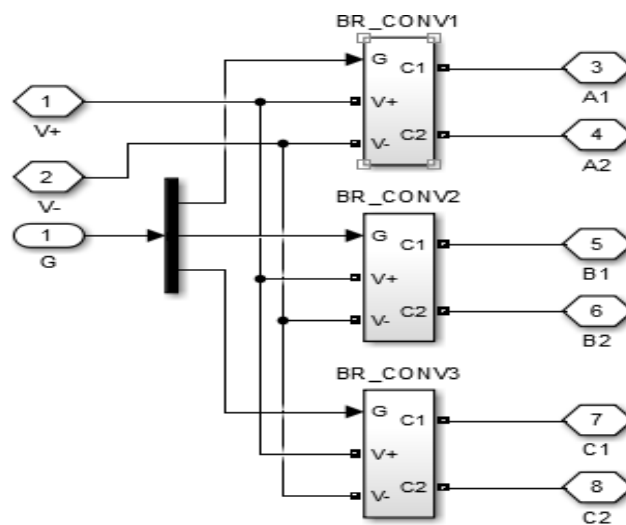


Figure II - 19 : Schéma de simulation des trois bras de convertisseur

Tableau II - 8 : Commutation des IGBT

Cas	IGBT	IGBT1	Tension de la phase
1	passant	passant	$+V_{dc}$ (phase de magnétisation)
2	Bloqué	passant	0 (phase de roue libre)
3	passant	Bloqué	0 (phase de roue libre)
4	Bloqué	Bloqué	$-V_{dc}$ (phase de démagnétisation)

II.10 Schéma bloc de simulation du model non-linéaire de la MRV

La construction des tableaux « look-up tables » constitue l'étape la plus complexe dans la simulation du modèle non linéaire. Les données générées par Motorsolve décrivent les caractéristiques du flux et le couple en fonction du courant et de la position du rotor. Cependant, dans ce modèle, les entrées du « look-up table » sont le flux et la position du rotor, tandis que le courant est la sortie. Il est donc nécessaire de déterminer une relation inverse, permettant de définir le courant en fonction du flux et de la position du rotor. Cette opération est réalisée à l'aide des fonctions « **linspace** » et « **interpole** ». La simulation s'appuie sur des blocs MATLAB/SIMULINK, comme présenté dans les figures.

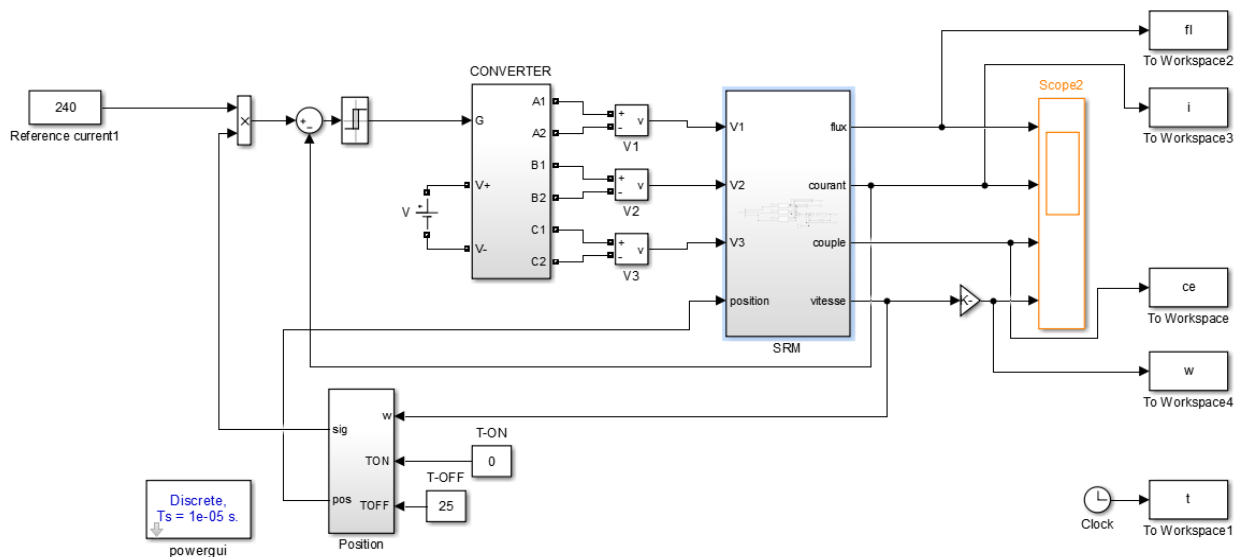


Figure II - 20 : Schéma bloc de simulation du modèle non linéaire de la MRV

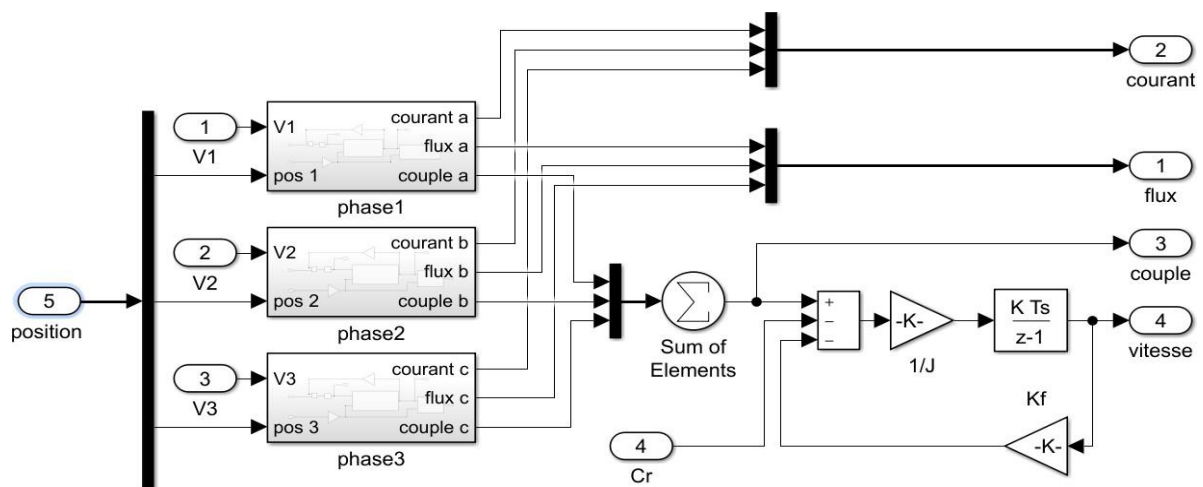


Figure II - 21 : Schéma bloc des trois phases du moteur MRV 24/16

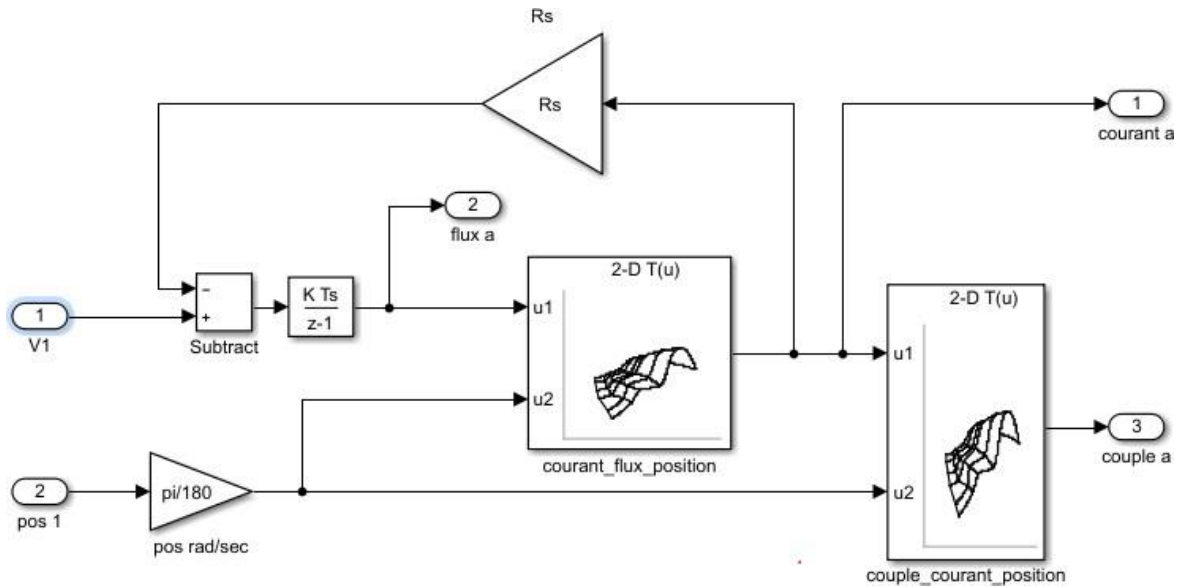


Figure II - 22 : Schéma bloc de simulation de la phase 1

Le flux dans le moteur à réluctance variable n'est pas constant mais doit être établi commençant par zéro dans chaque pas. Le processus est contrôlé en appliquant la tension d'alimentation sur l'angle θ_{on} , et en l'éteignant à l'angle de la commutation θ_{off} , le schéma bloc d'application des angles θ_{on} et θ_{off} est donné par la figure III.7.

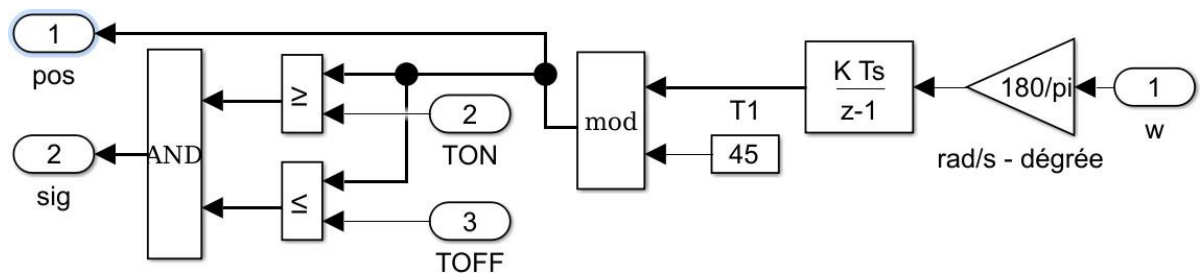


Figure II - 23 : Schéma bloc d'application des angles θ_{on} et θ_{off}

Résultats de simulation :

a) Fonctionnement à vide :

Les résultats de simulation de fonctionnement à vide sont donnés dans les figures suivantes pour $\theta_{on} = 0^\circ$, $\theta_{off} = 25^\circ$ et $I_{ref} = 240A$. On remarque que la vitesse atteint une valeur de 9850 tr/min, ce qui confirme les résultats obtenus à travers les caractéristiques de couple en fonction de vitesse dans la partie précédente.

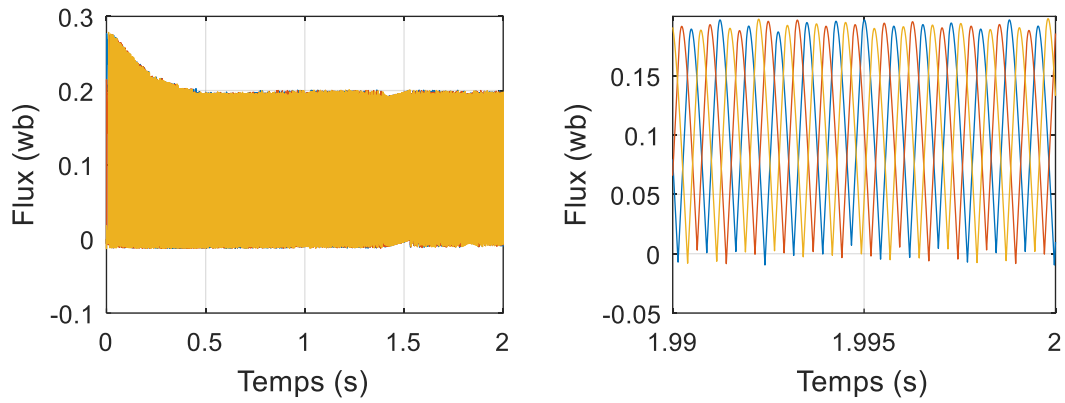


Figure II - 24: Flux magnétique des trois phases en fonction du temps

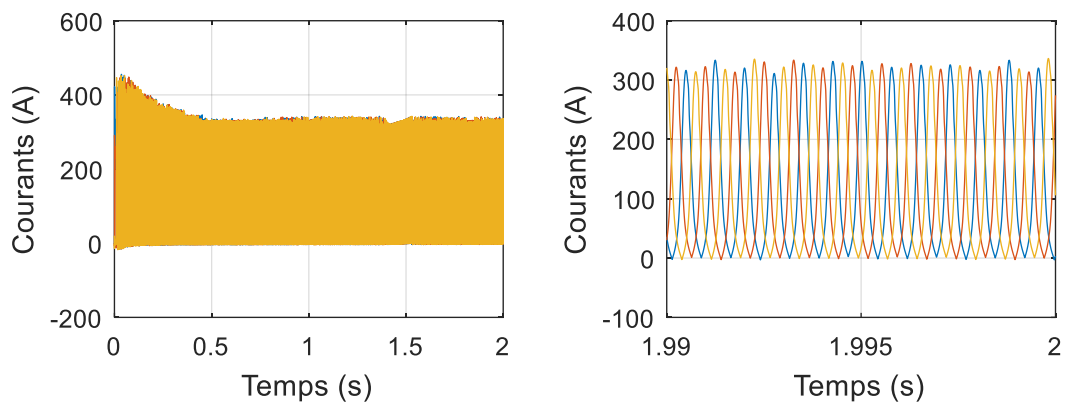


Figure II - 25: Courants des trois phases en fonction du temps

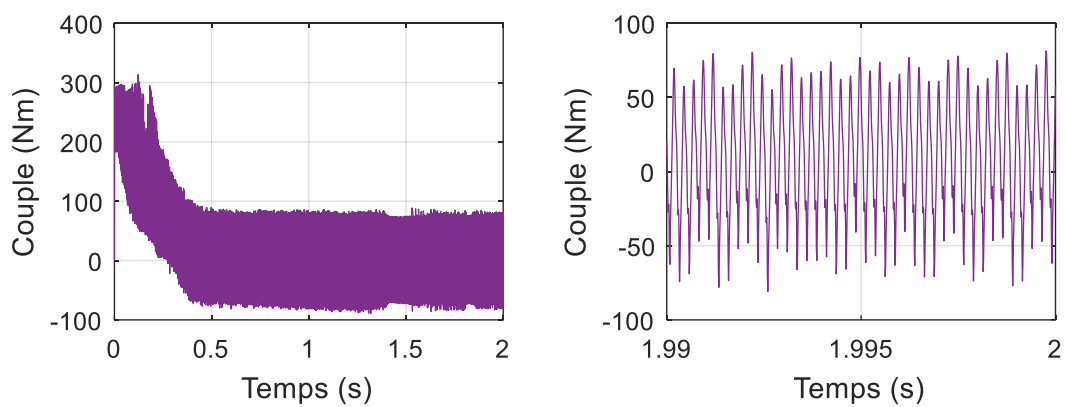


Figure II - 26: Couple électromagnétique total en fonction du temps

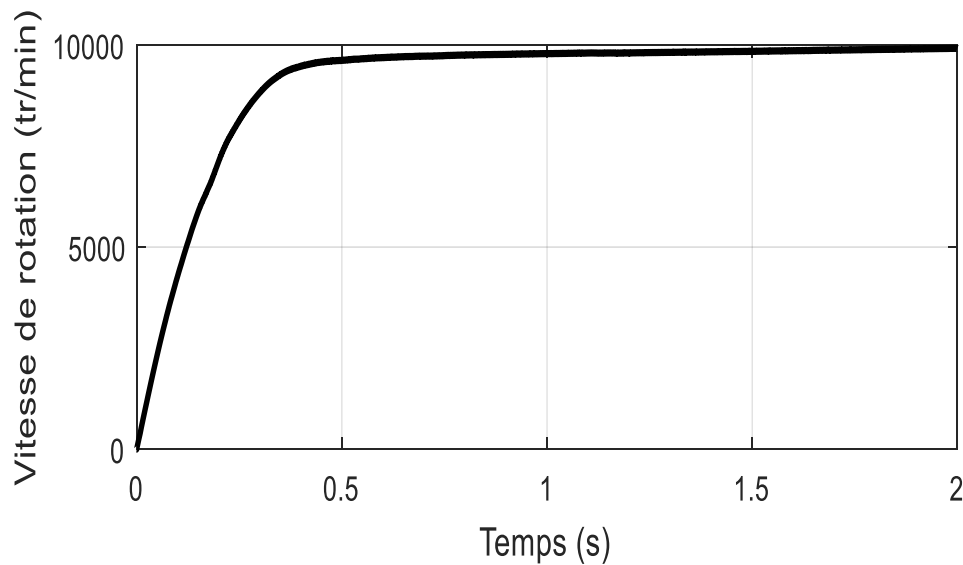


Figure II - 27 : Vitesse de rotation en fonction du temps

b) Fonctionnement en charge :

Les résultats de simulation obtenus sont présentés sur les figures (II.28, II.29, II.39 et II.31) pour l'application d'une charge (couple résistant) de $C_r = 207 \text{ Nm}$. Dans ces résultats, on constate que la vitesse atteint une valeur de 2800 tr/min dans le cas en charge, ce qui confirme également les résultats obtenus à travers les caractéristiques de couple en fonction de vitesse, où à la charge nominale le moteur tourne à la vitesse nominale.

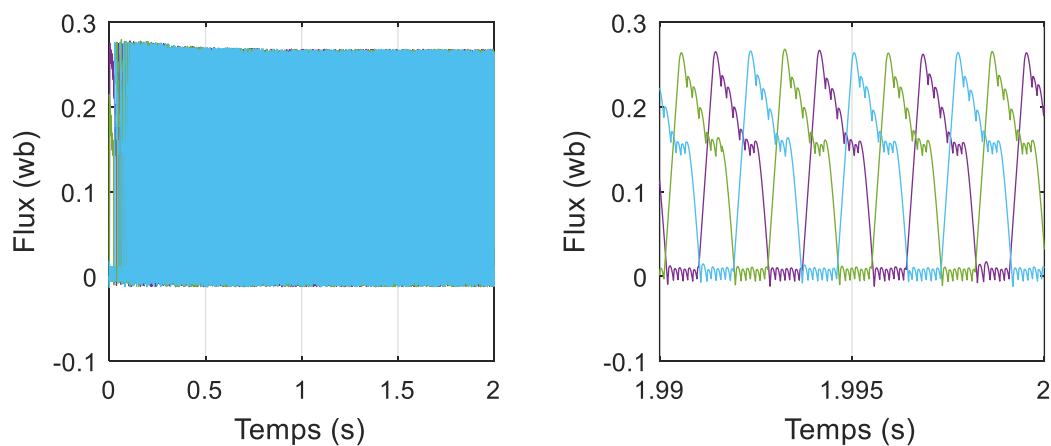


Figure II - 28 : Flux magnétique des trois phases en fonction du temps

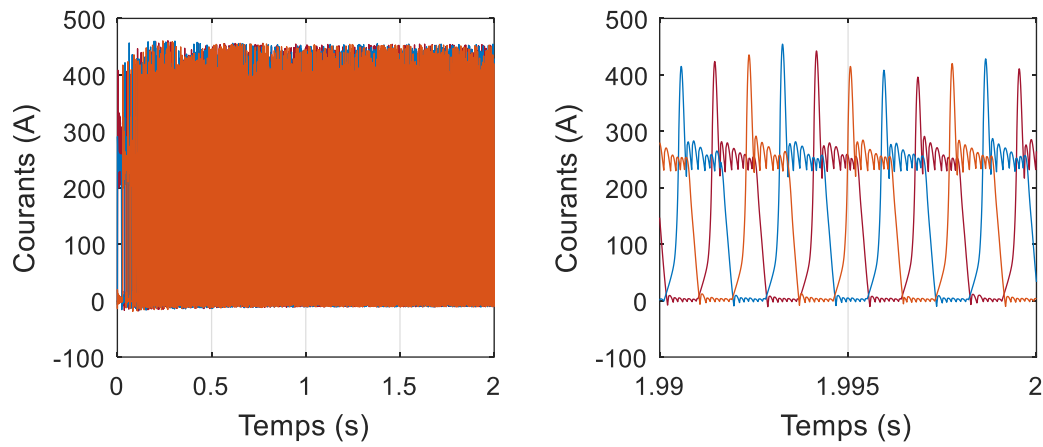


Figure II - 29 : Courant des trois phases en fonction du temps

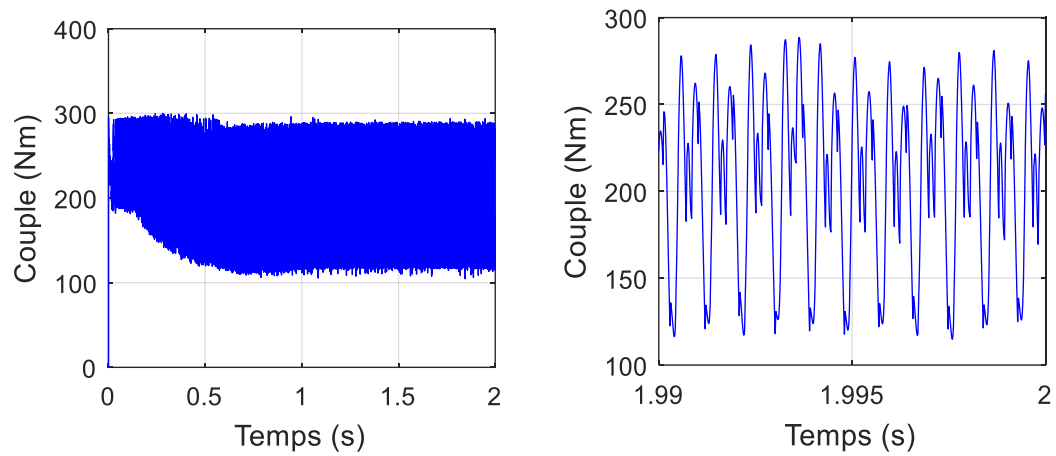


Figure II - 30 : Couple électromagnétique total en fonction du temps

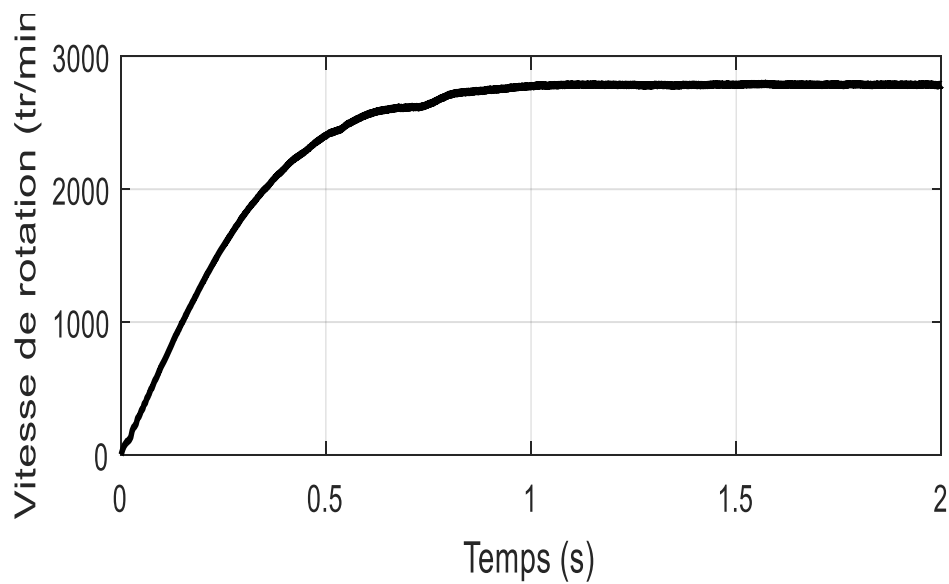


Figure II - 31 : Vitesse de rotation en fonction du temps

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé une conception approfondie d'un moteur à réluctance variable (MRV) de configuration 24/16 à l'aide du logiciel MotorSolve. Cette étape a permis d'optimiser les paramètres géométriques du moteur afin de réduire les ondulations de couple et d'améliorer ses performances globales.

Une fois les ajustements effectués, nous avons extrait les paramètres magnétiques du logiciel pour les intégrer dans des tables de correspondance (look-up table), garantissant ainsi une modélisation plus fidèle sous Simulink. Cette approche nous a permis de simuler le comportement du moteur dans des conditions dynamiques et d'analyser les performances obtenues avec les modifications apportées.

Les résultats de cette simulation constituent une base solide pour valider les choix de conception et affiner la stratégie de commande du moteur, ouvrant ainsi la voie à une intégration optimisée de techniques avancées de contrôle.

CHAPITRE III

COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE DE LA MRV 24/16

III.1 Introduction

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, l'industrie automobile cherche à développer des technologies plus performantes et durables pour la propulsion électrique. Parmi les différentes solutions envisagées, la machine à réluctance variable (MRV) se distingue par son efficacité et sa robustesse, ce qui en fait un choix privilégié pour les applications de traction électrique. Cependant, malgré ses nombreux avantages, cette machine présente des limitations importantes telles que l'ondulation du couple et le bruit acoustique, qui peuvent nuire au confort du conducteur et réduire les performances globales du véhicule [11].

Pour pallier ces problématiques, plusieurs approches sont envisagées, allant de l'optimisation structurelle à l'amélioration des stratégies de commande. Dans ce travail, nous nous focalisons sur la commande du moteur MRV, qui joue un rôle déterminant dans la stabilité et l'efficacité du système de traction. Les techniques de commande classiques, comme la régulation PI, sont largement utilisées dans les applications industrielles en raison de leur simplicité et de leur robustesse. Toutefois, elles ne sont pas toujours adaptées aux systèmes fortement non linéaires tels que le MRV [19].

Ainsi, une alternative prometteuse consiste à intégrer des approches plus avancées, notamment la commande par logique floue (FLC), qui offre une meilleure adaptabilité aux variations du système et permet de réduire efficacement les défauts intrinsèques du moteur. L'objectif de ce chapitre est donc d'analyser ces deux stratégies de commande et d'évaluer leurs impacts sur les performances du moteur MRV.

Nous aborderons dans un premier temps les principes fondamentaux de la commande PI et FLC, avant de procéder à une analyse comparative basée sur plusieurs critères tels que la réduction de l'ondulation du couple, la dynamique du système et l'efficacité énergétique. Cette étude permettra d'identifier la solution la plus appropriée pour améliorer le comportement du moteur MRV et optimiser son intégration dans les systèmes de traction électrique.

III.2 Régulation de la vitesse du moteur MRV 24/16

III.2.1 Régulateur à action proportionnelle et intégrale PI

Dans cette partie, nous nous intéressons à la mise en place d'un régulateur PI pour contrôler la vitesse du MRV, en visant une régulation efficace tout en cherchant à minimiser l'ondulation du couple. Le contrôleur de courant à hystérésis est utilisé, car il offre une réponse rapide et une gestion précise des courants des phases, garantissant ainsi un fonctionnement stable du moteur.

Les régulateurs PI sont utilisés dans l'industrie pour les entraînements. Dans beaucoup de processus industriels, le contrôle de la vitesse est indispensable particulièrement lors des phénomènes transitoires. Cela permet d'assurer une bonne qualité du produit. Beaucoup de non-linéarités interviennent dans les entraînements. Le contrôleur de la vitesse convertit l'erreur de la vitesse à une valeur du couple électromagnétique de référence (ou à une valeur du courant de référence) [16]. Les limitations du courant entre des valeurs prédéterminées sont accomplies en limitant le produit du régulateur de vitesse. Les contrôleurs de la vitesse les plus utilisés pour les entraînements contiennent deux boucles de contrôle séparées (figure (III.1)). La boucle intérieure est responsable de la régulation du courant et incorpore un régulateur à hystérésis. Ce régulateur est activé par l'erreur entre le courant de référence et le courant mesuré du moteur. La référence du courant est produite par la boucle extérieure du contrôle, dans lequel l'erreur entre la référence de la vitesse et sa valeur réelle sollicite le régulateur PI de vitesse. Pour simplifier les calculs, le système peut être découplé en deux modes: mode rapide (mode électrique) et mode lente (mode mécanique). Cette hypothèse est admissible quand la constante du temps mécanique est beaucoup plus grande que celle électrique. Dans ce cas, la boucle du contrôle du courant peut être considérée comme unitaire

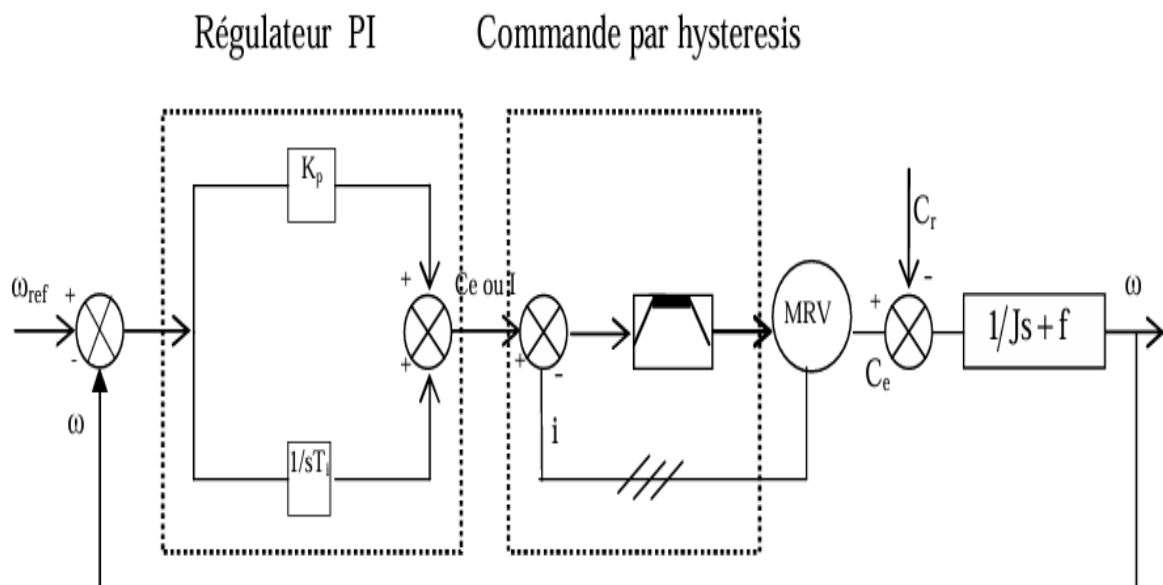


Figure III – 1 : Schéma structural de la commande PI [19]

III.2.2 Structure du régulateur PI

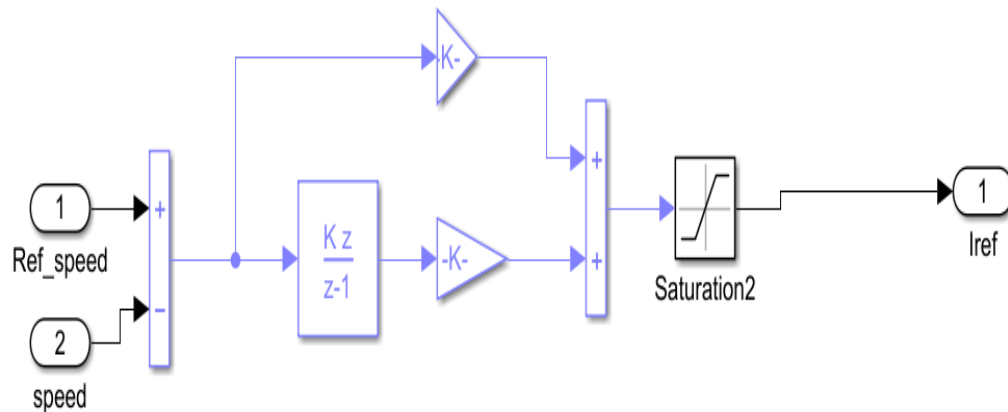


Figure III – 2 : Schéma de régulateur PI

III.2.3 Calcul des paramètres du régulateur PI

Le réglage du régulateur de l'entraînement électrique est un problème complexe dû au grand nombre de non-linéarités de la machine, du convertisseur électronique et du contrôleur. La non-linéarité inhérente de la MRV est difficile à éliminer pour un réglage adéquat des paramètres du contrôleur. Le convertisseur de puissance présente une caractéristique de transfert non linéaire à cause des temps morts imposés par la commutation [16]. Un obstacle supplémentaire pour le réglage optimal des paramètres du PI de la vitesse est la difficulté de caractériser la charge. Le système peut être décrit comme un système standard de deuxième ordre .

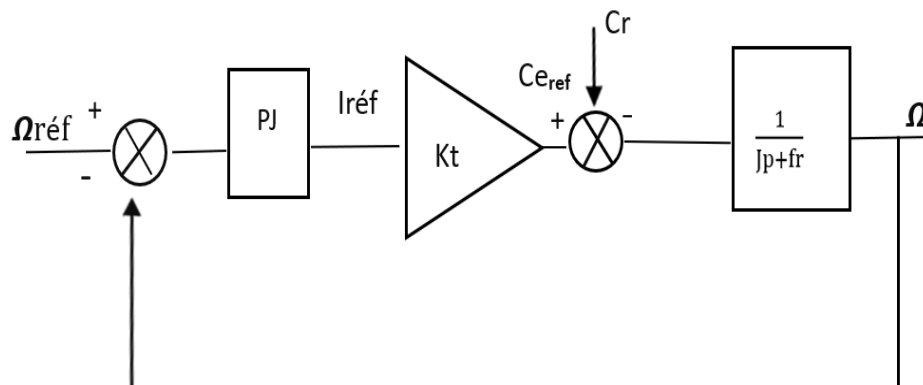


Figure III – 3 : Schéma bloc de régulation de la vitesse

A vide, $Cr = 0$

$$\text{La FTBO}(s) = \left(Kp + \frac{ki}{s}\right) \left(\frac{Kt}{Js+fr}\right) \quad (\text{III.1})$$

$$\text{FTBO}(s) = \frac{kt(kps+Ki)}{s(Js+fr)} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{FTBF}(s) = \frac{\frac{kt(kps+Ki)}{s(Js+fr)}}{1 + \frac{kt(kps+Ki)}{s(Js+fr)}} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{FTBF}(s) = \frac{\frac{kt kps}{J} + \frac{kt ki}{J}}{s^2 + \frac{(fr+kpkt)}{J}s + \frac{kikt}{J}} \quad (\text{III.4})$$

Par identification a un système de deuxième ordre on obtient ;

$$\frac{wn^2}{s^2 + 2\zeta wn s + wn^2} \quad (\text{III.5})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{fr + Kp \cdot Kt}{J} = 2\zeta wn \\ \frac{Ki \cdot Kt}{J} = wn^2 \\ Kt = \frac{ce}{Iref} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Ki = \frac{Jwn^2 \cdot Iref}{ce} \\ Kp = \frac{2J\zeta wn - fr}{kt} \end{array} \right.$$

J Moment d'inertie

fr Coefficient aux frottement visqueux

ζ coefficient d'amortissement

III.2.4 Schéma bloc de réglage de la vitesse par régulateur PI

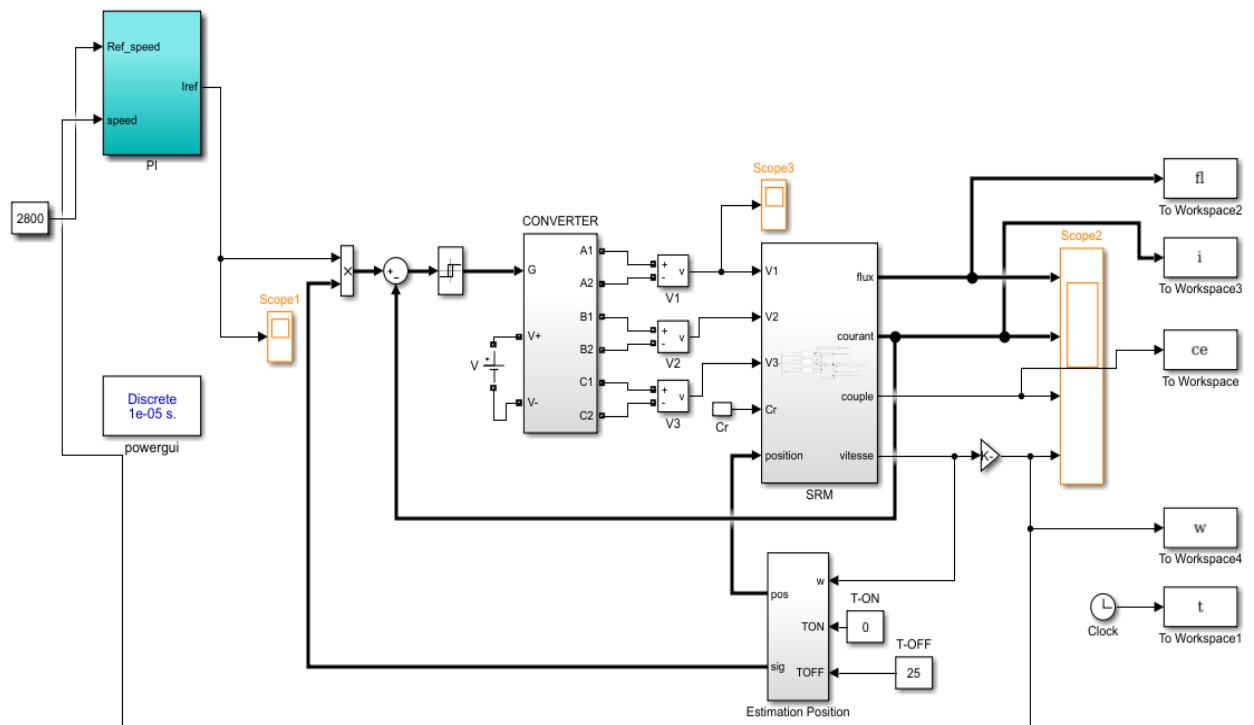


Figure III - 4 : Schéma bloc de réglage de la vitesse par régulateur PI

Résultats de simulation

a) Fonctionnement à vide

Les résultats de simulation de fonctionnement à vide avec le régulateur PI sont donnés dans les figures (III.5.6.7 et 8) pour $\theta_{on} = 0^\circ$, $\theta_{off} = 25^\circ$ et $I_{ref} = 240A$. On remarque que la vitesse atteint une valeur de 2800 tr/min, ce qui confirme la fiabilité de la commande utilisant le régulateur PI. Bien que la machine fonctionne à vide, la vitesse a suivi la consigne de référence, qui est de 2800 tr/min.

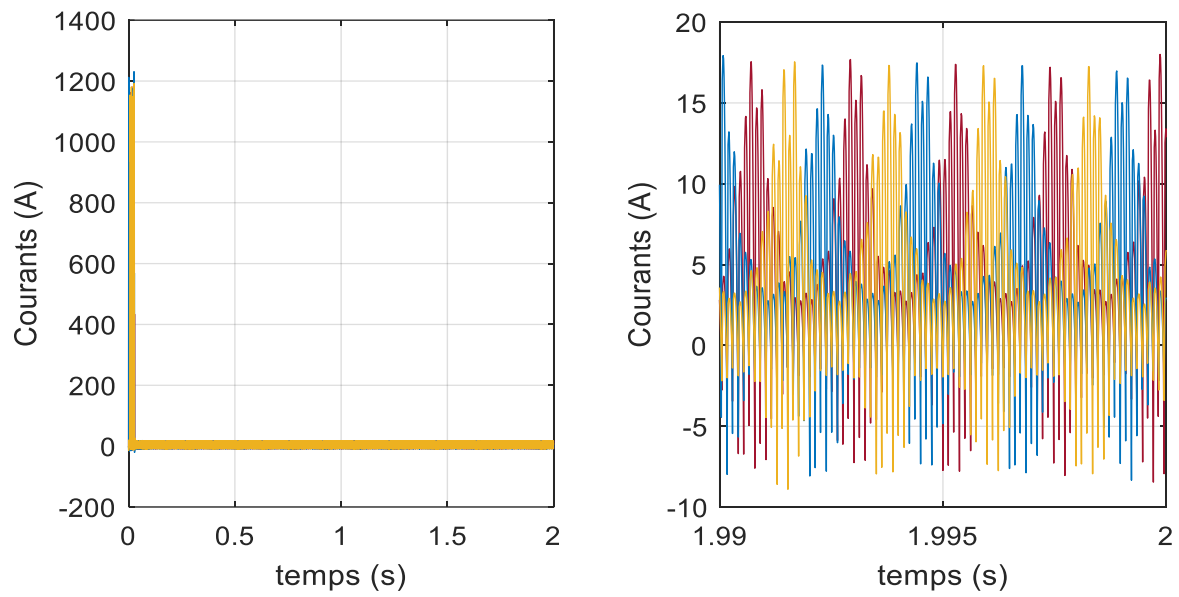


Figure III - 5 : Courant des phases en fonction du temps

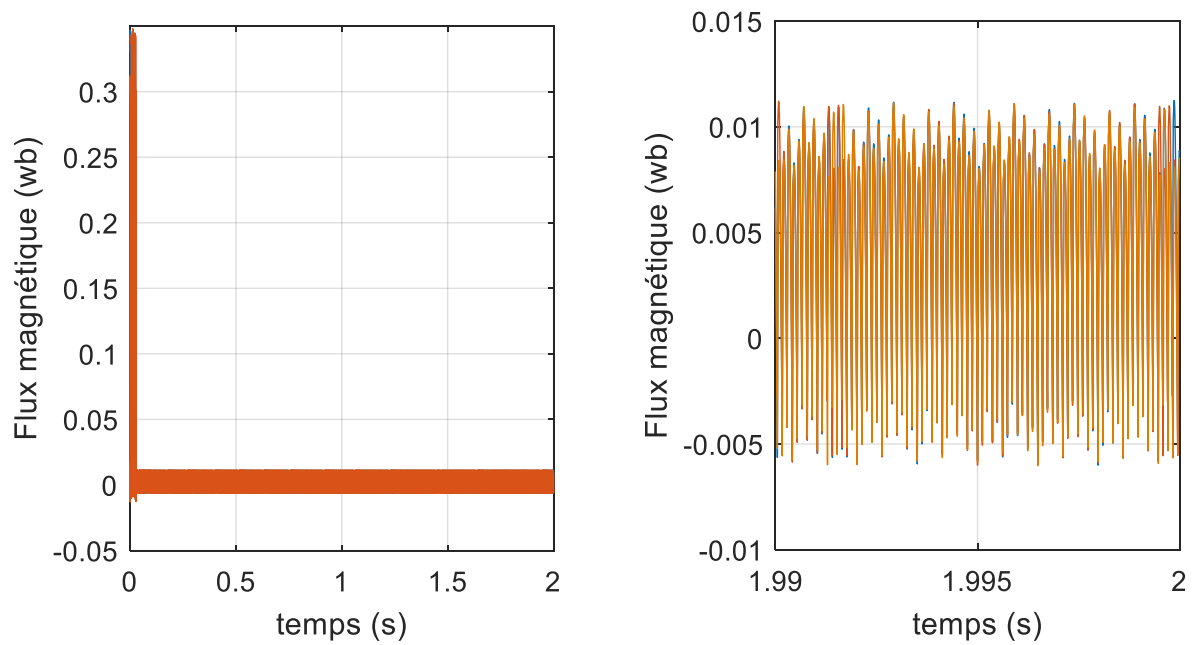


Figure III - 6 : Flux magnétique en fonction du temps

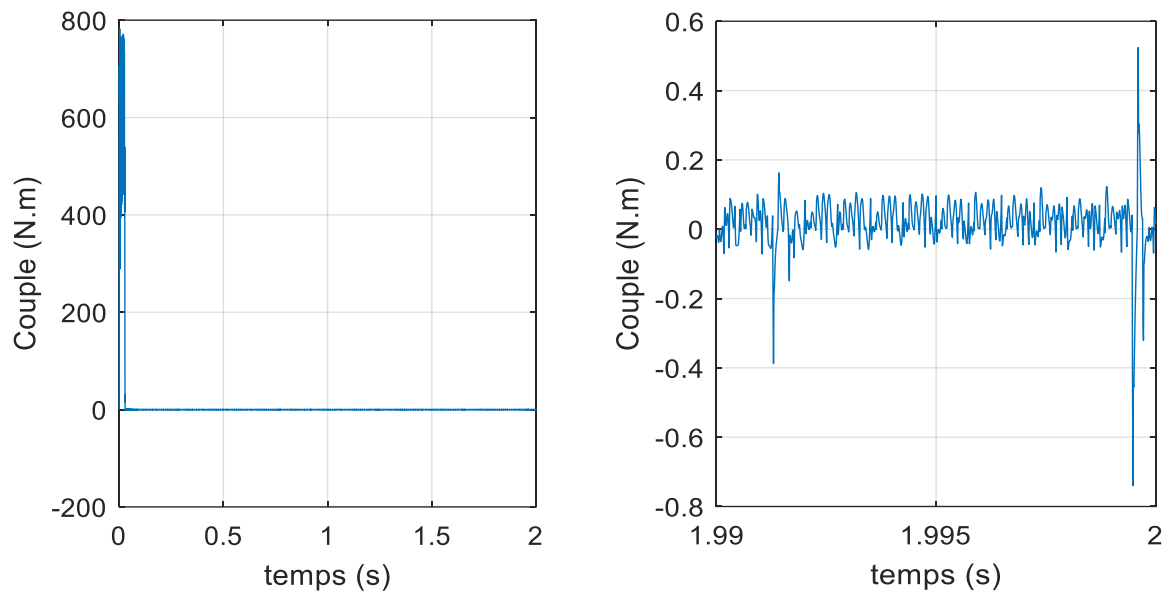


Figure III - 7 : Couple électromagnétique en fonction du temps

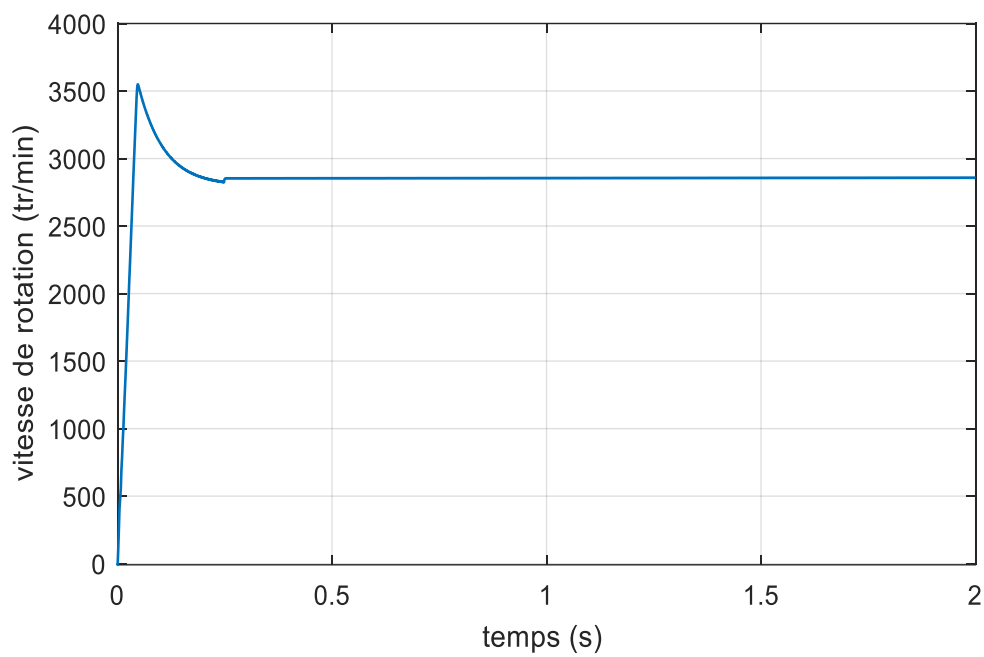


Figure III - 8 : Vitesse de rotation à vide en fonction du temps

b) Fonctionnement en charge

Les simulations reportées sur les figures (III.9, III.10, III.11 et III.12) concernent l'application d'un échelon de vitesse de 2800 tr/min, puis nous avons introduit une charge de 207 N.m. Ces résultats montrent les performances de la régulation. On note, un dépassement au bout d'un temps de 0.2s à cause de l'action intégrale du régulateur PI qui produit un dépassement au premier instant de démarrage. D'après les figures (III.9, III.10), nous pouvons observer que le courant, le flux et augmentent par rapport aux fonctionnements à vide. Cette augmentation est due à l'application de la charge.

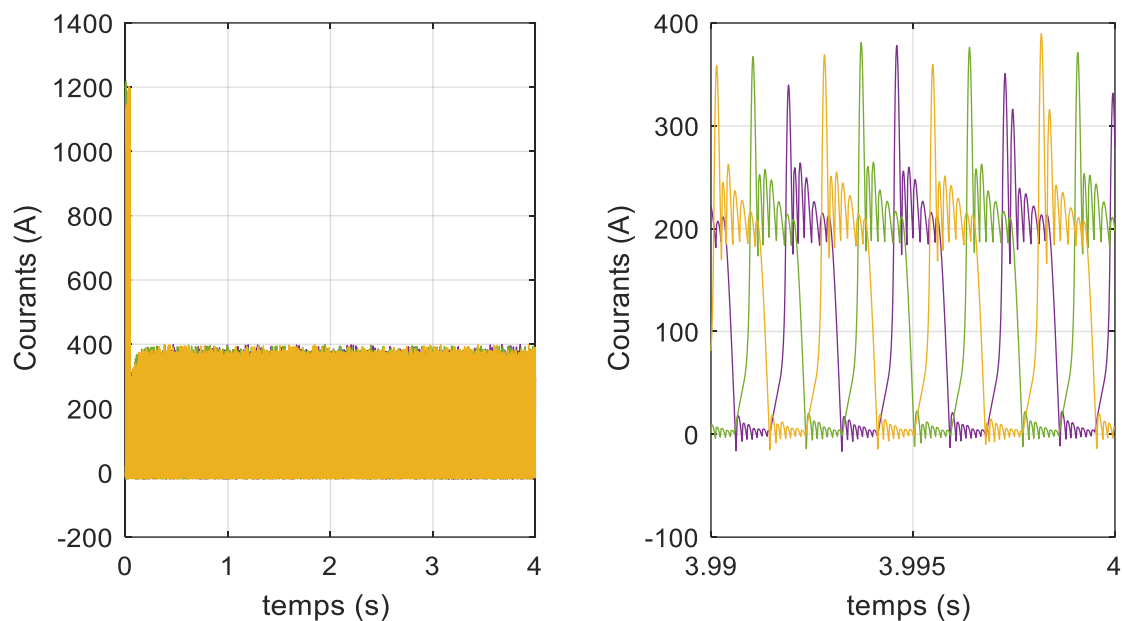


Figure III - 9 : Courant des trois phases en fonction du temps

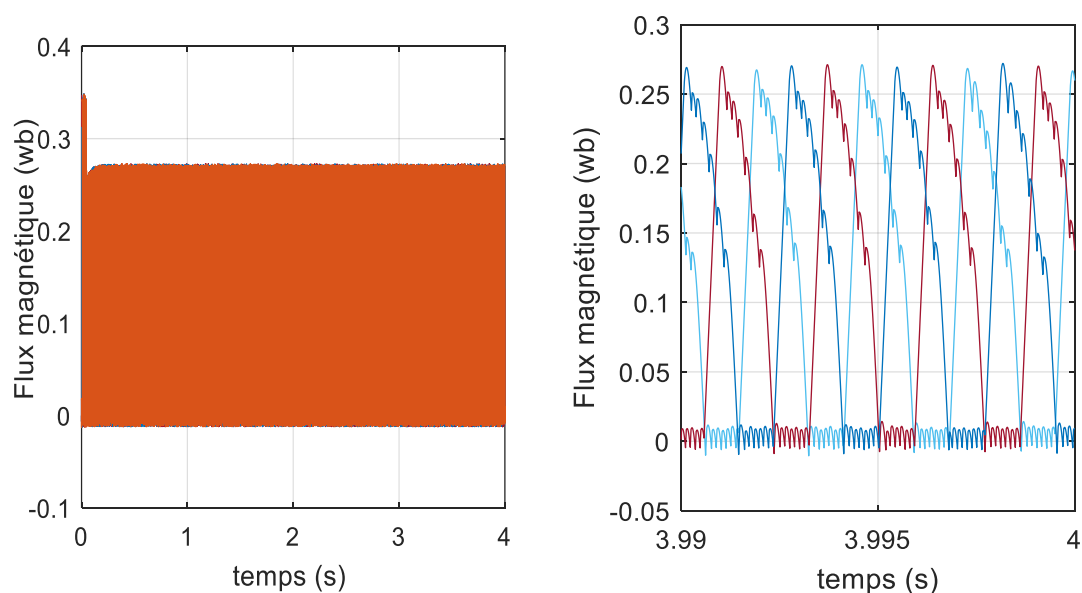


Figure III - 10 : Flux magnétique en fonction du temps

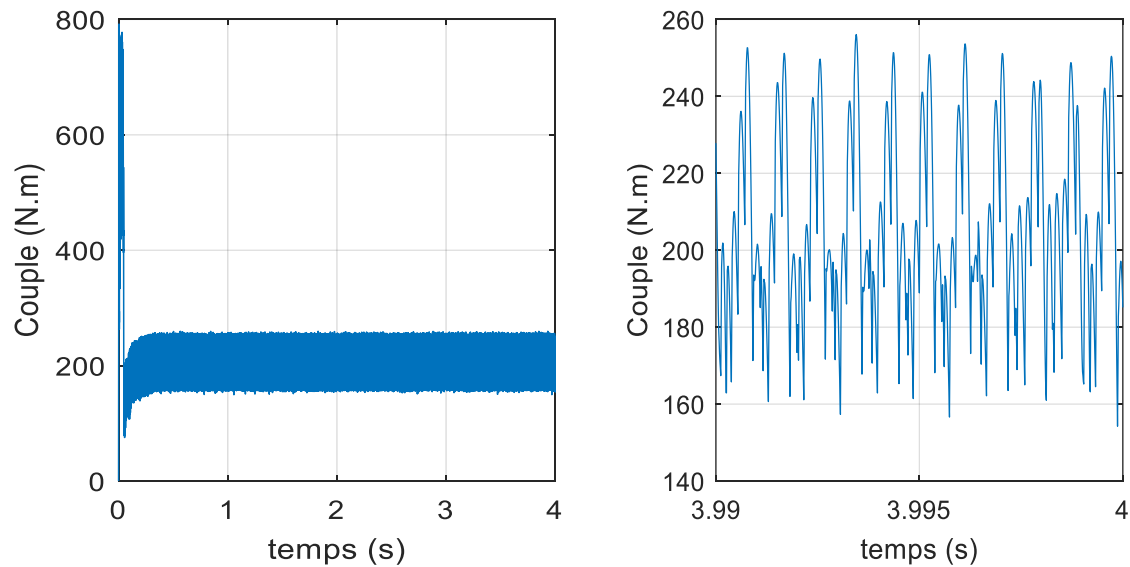


Figure III – 11 : Couple électromagnétique en fonction du temps

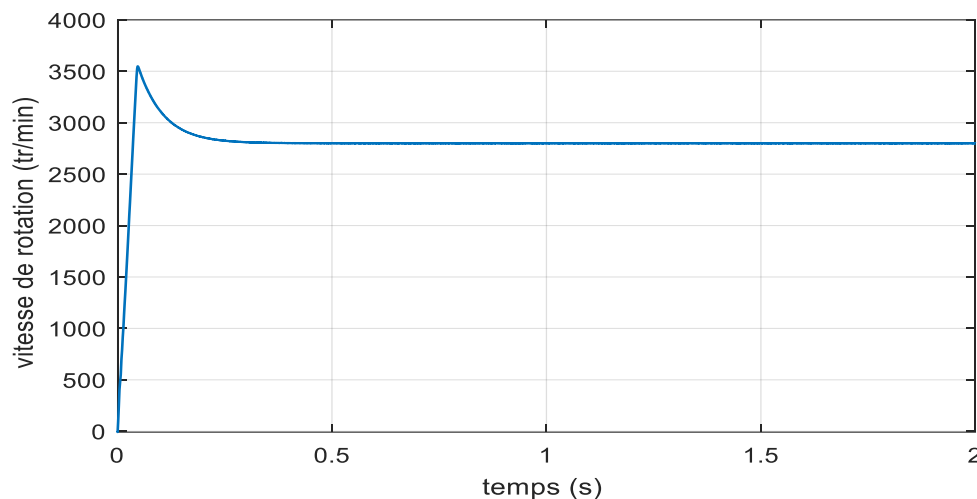
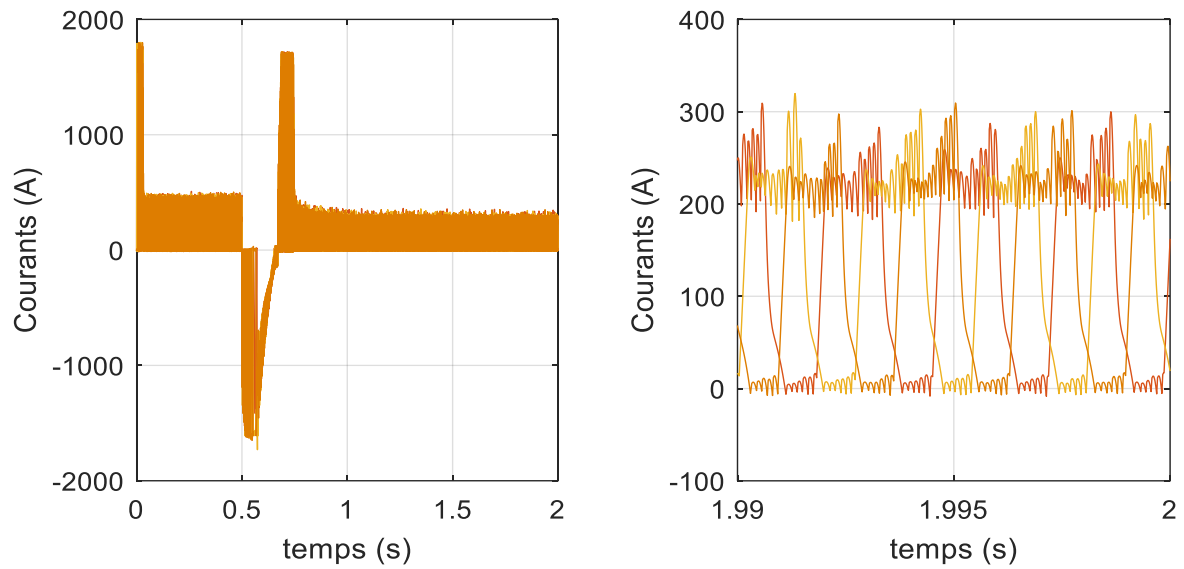
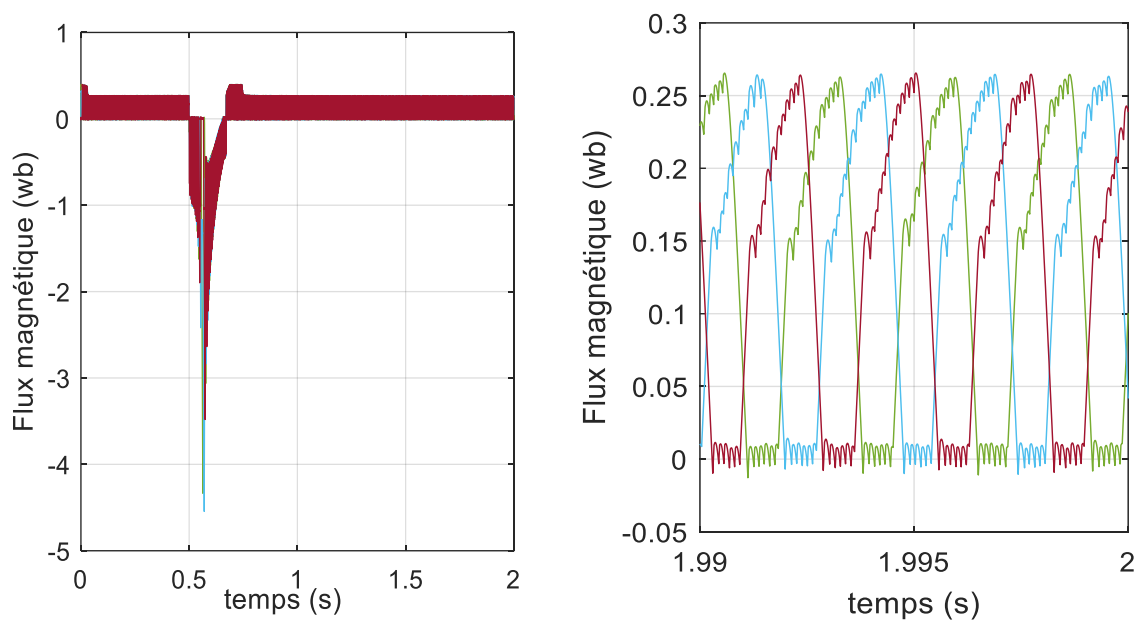


Figure III – 12 : vitesse de rotation en charge en fonction du temps

c) Inversion de sens de rotation

Pour réaliser ce test on introduit une inversion de sens de rotation du moteur de $\Omega_{\text{réf}}=2800$ (tr/min) à $\Omega_{\text{réf}} = -2800$ (tr/min) à l'instant $t=1$ s. Les figures (III.13, III.14, III.15 et III.16) montrent que les grandeurs telles que la vitesse, le couple, les flux et les courants sont influencées par cette variation. On constate également que le couple et la vitesse suit sa consigne et l'inversion de sens de rotation, donc on peut dire que la robustesse de cette commande est garantie vis-à-vis de ce fonctionnement.

**Figure III – 13 : Courant des phases en fonction du temps****Figure III – 14 : Flux magnétique en fonction du temps**

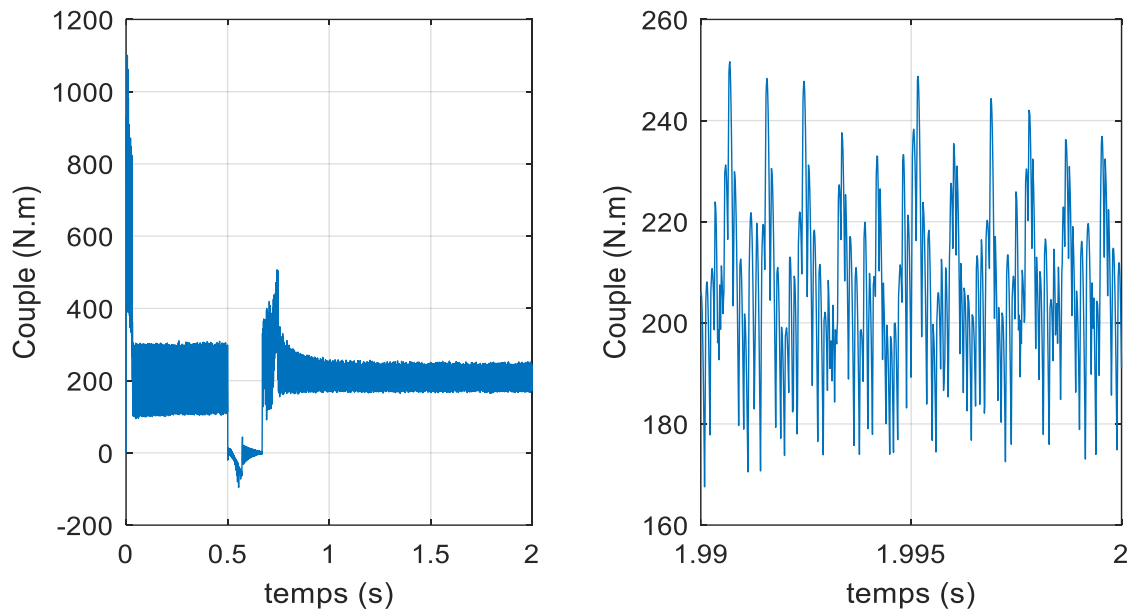


Figure III – 15 : Couple électromagnétique en fonction du temps

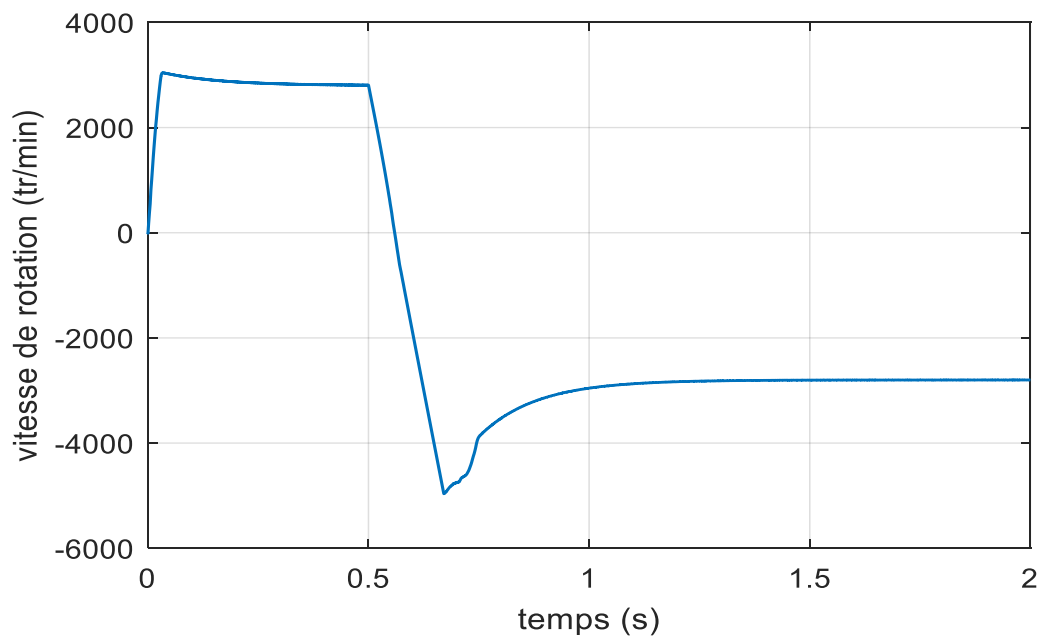


Figure III – 16 : vitesse de rotation en fonction du temps

III.3 Commande de la MRV par logique floue

Dans cette section, nous nous intéressons à la conception d'un contrôleur flou destiné à la régulation de la vitesse d'une machine à réluctance variable (MRV), tout en minimisant l'ondulation du couple. Afin de contrôler les courants de phase, nous avons opté pour un régulateur à hystérésis, qui s'avère suffisant pour cette application [11].

Le schéma fonctionnel du réglage par logique floue de la MRV est illustré à la figure III.9. La commande repose sur une architecture à double boucle de régulation en boucle fermée :

- Boucle externe : elle assure le contrôle de la vitesse via le régulateur flou.
- Boucle interne : elle pilote le courant à l'aide d'un régulateur à hystérésis.

Le régulateur flou de vitesse génère un courant de référence, déterminé en fonction de l'erreur entre la vitesse réelle du rotor et la vitesse de consigne.

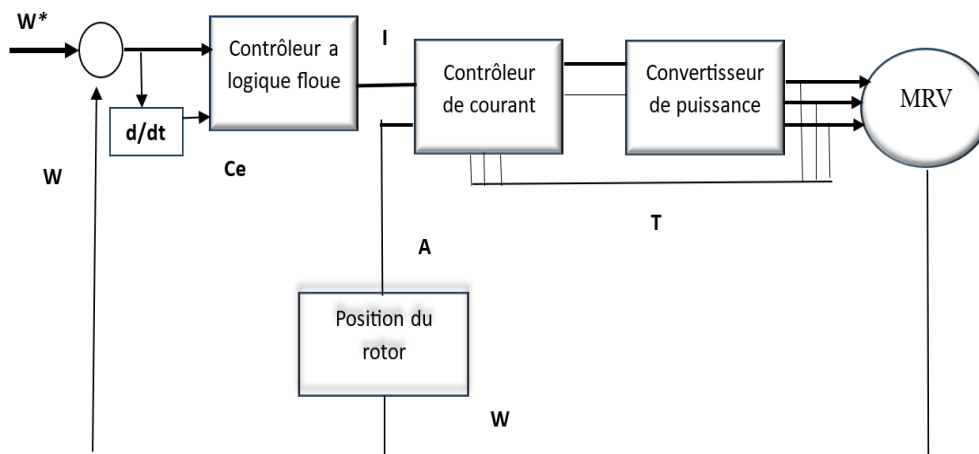


Figure III - 17 : Schéma fonctionnel de la régulation floue de la MRV

III.3.1 Structure du contrôleur flou

Le contrôleur flou ajuste la vitesse du rotor en fonction de la consigne de référence tout en minimisant les variations indésirables. Il utilise la vitesse réelle pour calculer l'erreur et sa dérivée, pondérées par des gains (K) avant d'être traitées par le contrôleur flou. Ce dernier applique des règles floues pour produire une commande optimisée. Enfin, la sortie passe par une action intégrale $\frac{Kz}{(z-1)}$ pour assurer un suivi sans erreur permanente générant le courant de référence (**Iref**) qui pilote l'actionneur du moteur.

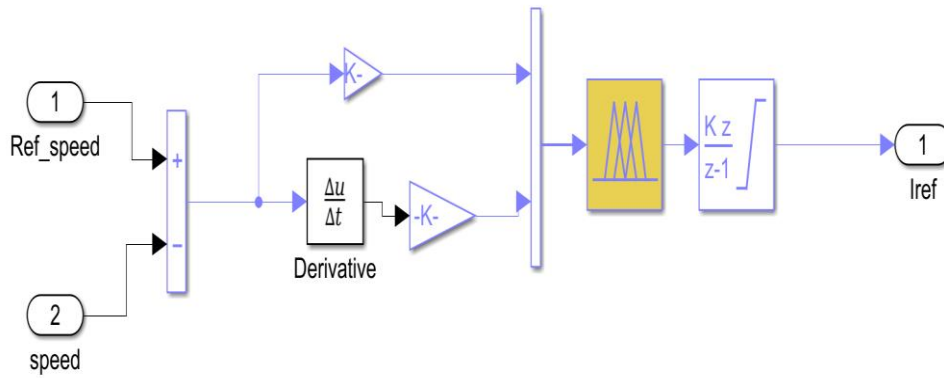


Figure III - 18 : Schéma-bloc de contrôleur flou de la vitesse (FLC)

III.3.2 Définition les variables du système

Les entrées sont l'erreur et la variation de l'erreur notées respectivement E_ω et ΔE_ω

La sortie est le courant de référence I_{ref} .

Les entres sont standardisé dans un univers $[-1 \times 10^5, 1 \times 10^5]$.

Les variables d'entrée dont les fonctions d'appartenance des ensembles flous sont triangulaires et trapézoïdales.

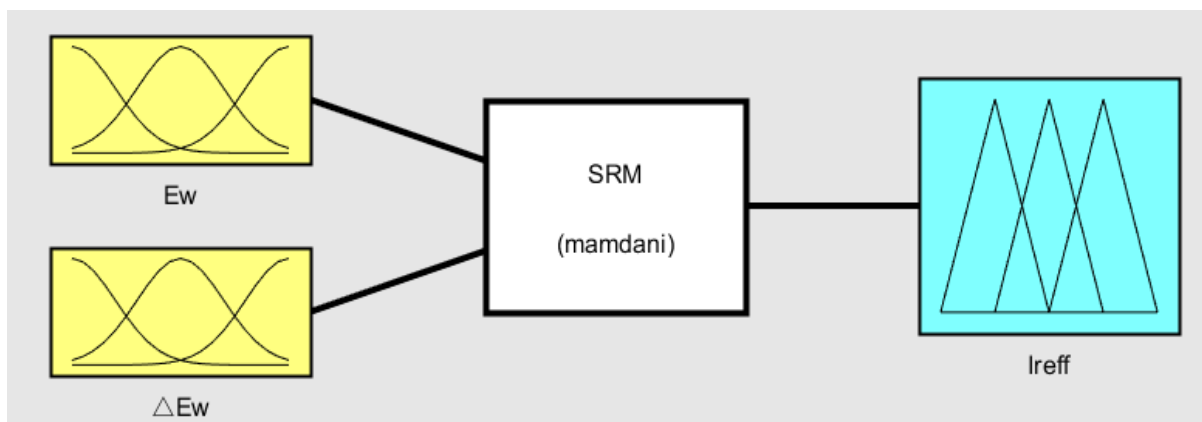


Figure III - 19 : un schéma d'un système FLC utilisant la méthode d'inférence Mamdani

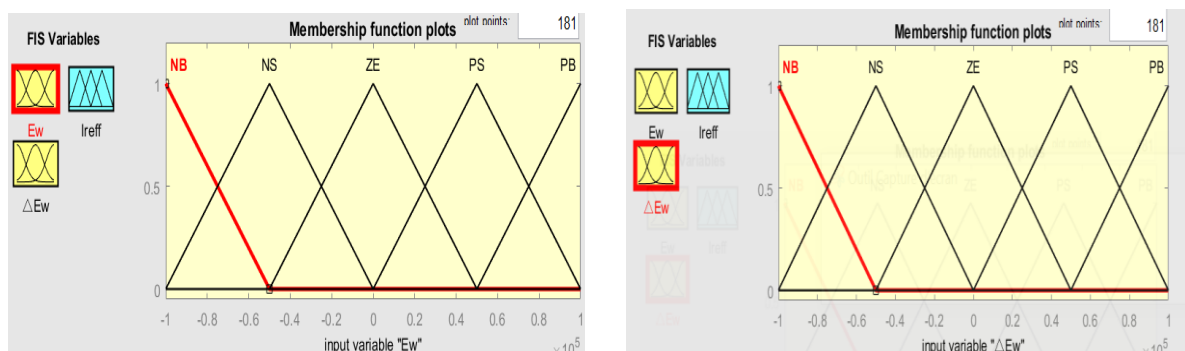


Figure III - 20 : Fonctions d'appartenances des entrées E_ω et $[\Delta E_\omega]$

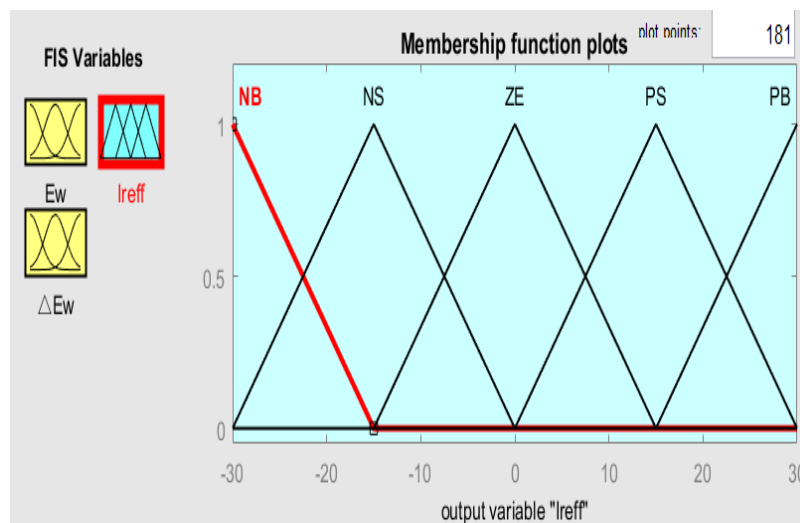


Figure III - 21 : Fonction d'appartenance de la sortie *Iref*

Les règles floues, utilisées pour déterminer la sortie du régulateur à partir des variables d'entrée, sont établies à partir de la table de Mac-Vicar. Dans ce cas, le système repose sur 25 règles, présentées dans le tableau d'inférence III.2. Chaque variable linguistique est répartie en cinq catégories, chacune associée à une fonction d'appartenance spécifique. En se basant sur le principe de fonctionnement du contrôleur, ces règles d'inférence floue sont formulées afin d'optimiser la prise de décision du système.

Tableau III - 2 : Règles d'inférence floue

E \ dE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

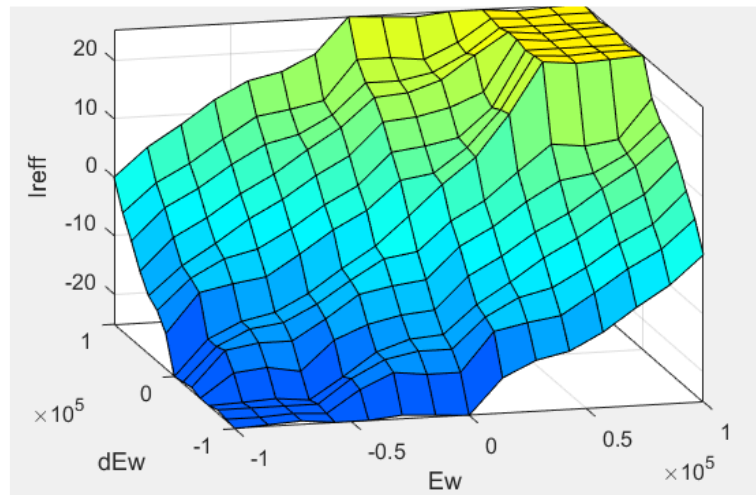


Figure III - 22 : surface d'inférence floue (FLC)

III.3.3 Schéma bloc de réglage de la vitesse par contrôleur flou

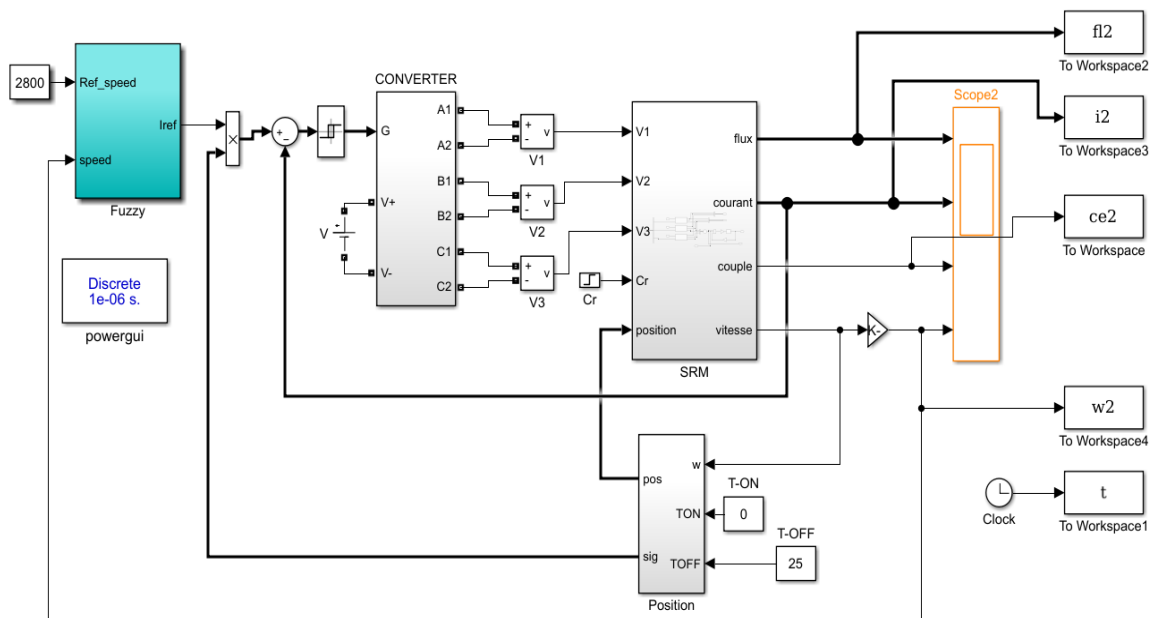


Figure III - 23 : Schéma bloc de simulation de réglage de la vitesse par contrôleur flou (FLC)

Résultats de simulation

d) Fonctionnement à vide

Les figures (III.24, III.25, III.26 et III.27) présente le fonctionnement à vide du moteur avec une régulation floue (FLC), sur les grandeurs caractéristiques du système, notamment la vitesse, le couple, les flux et les courants répond de manière très précise aux consignes, avec une transition fluide et une minimisation des fluctuations. Cette adaptabilité permet au contrôleur d'anticiper et de compenser les variations internes du système, garantissant ainsi un comportement dynamique robuste.

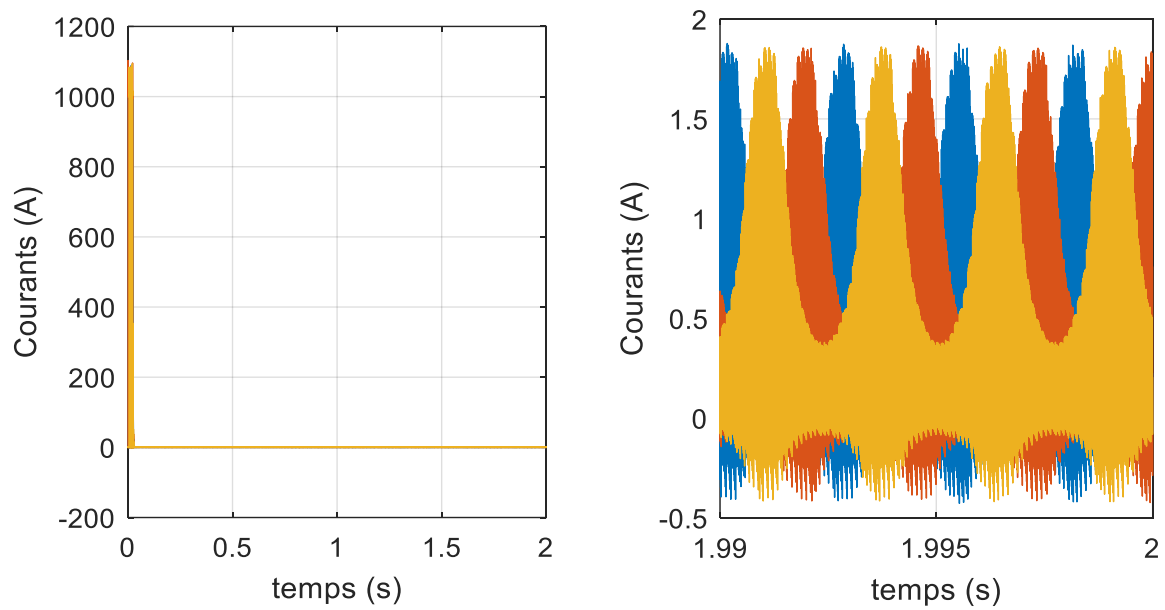


Figure III - 24 : Courant des phases en fonction du temps

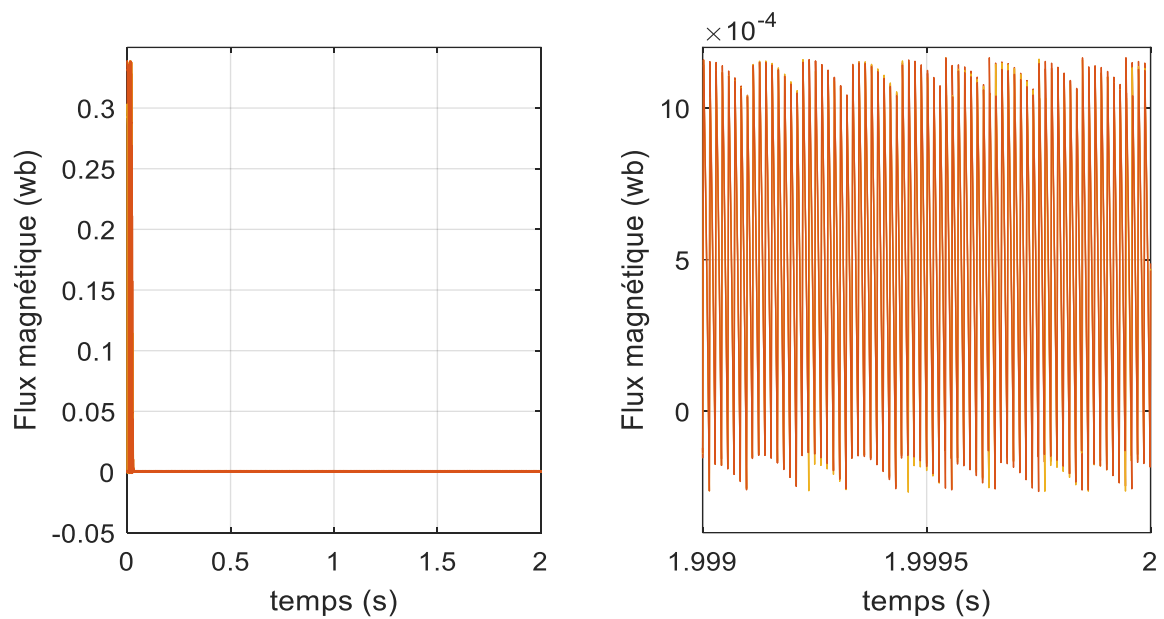


Figure III - 25 : Flux magnétique en fonction du temps

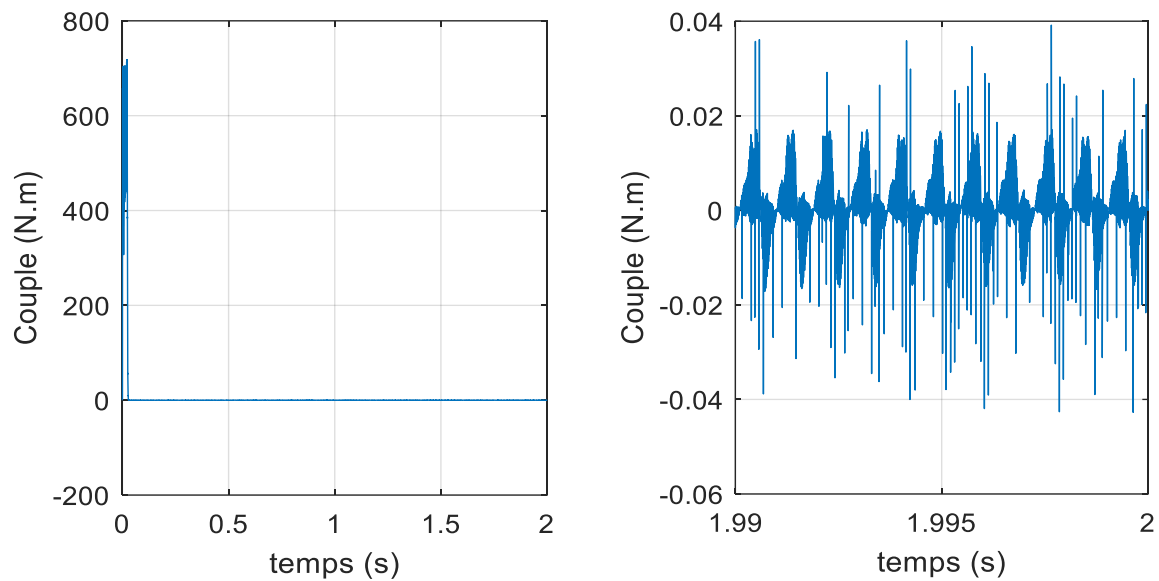


Figure III - 26 : Couple électromagnétique en fonction du temps

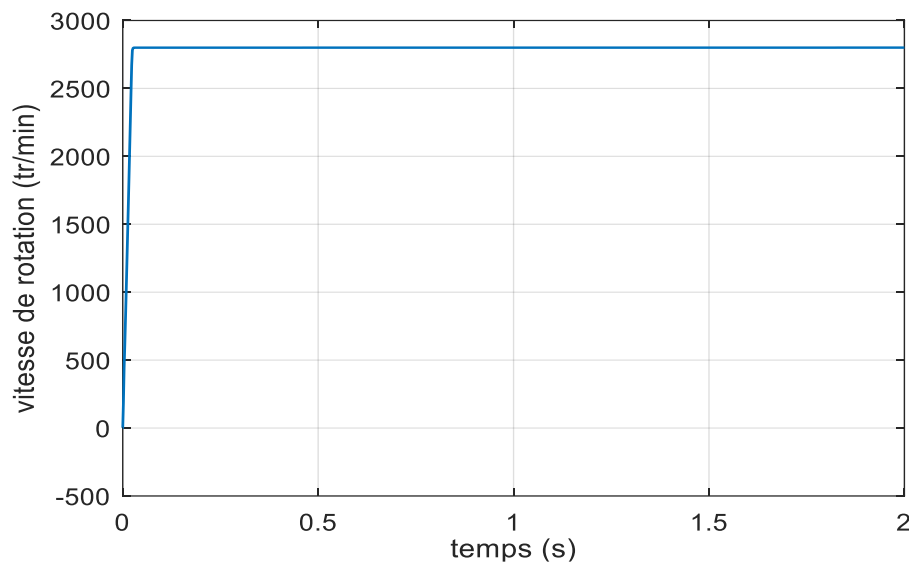
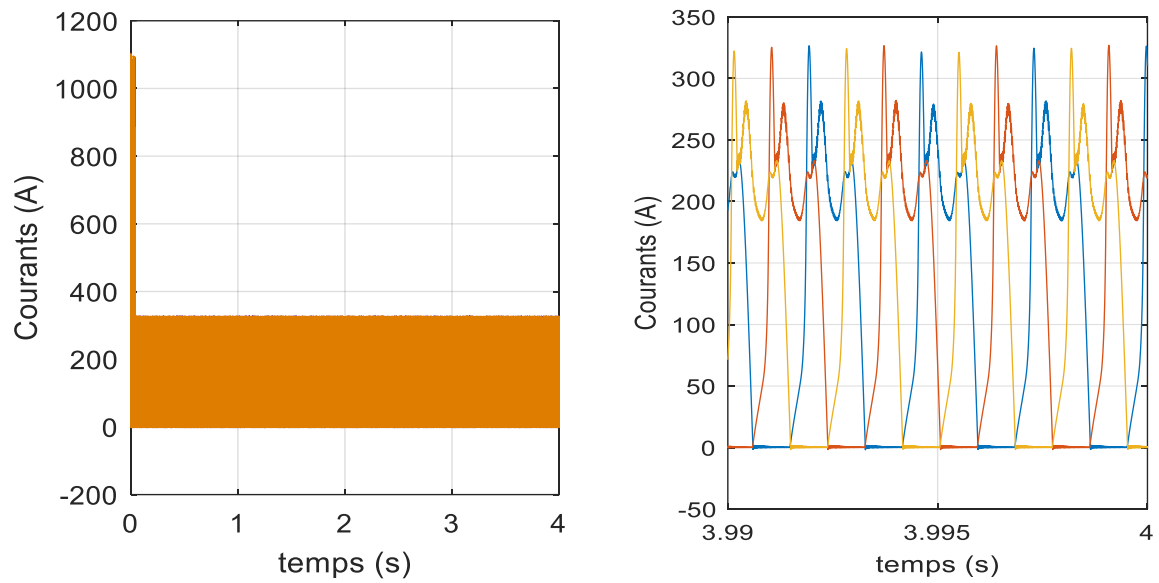
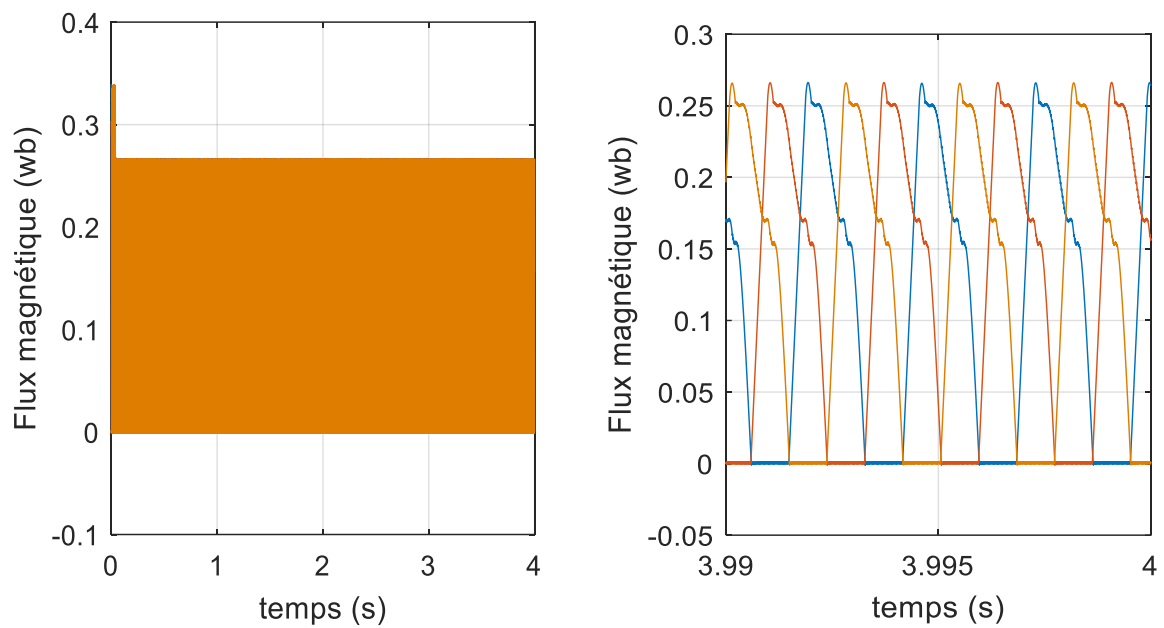
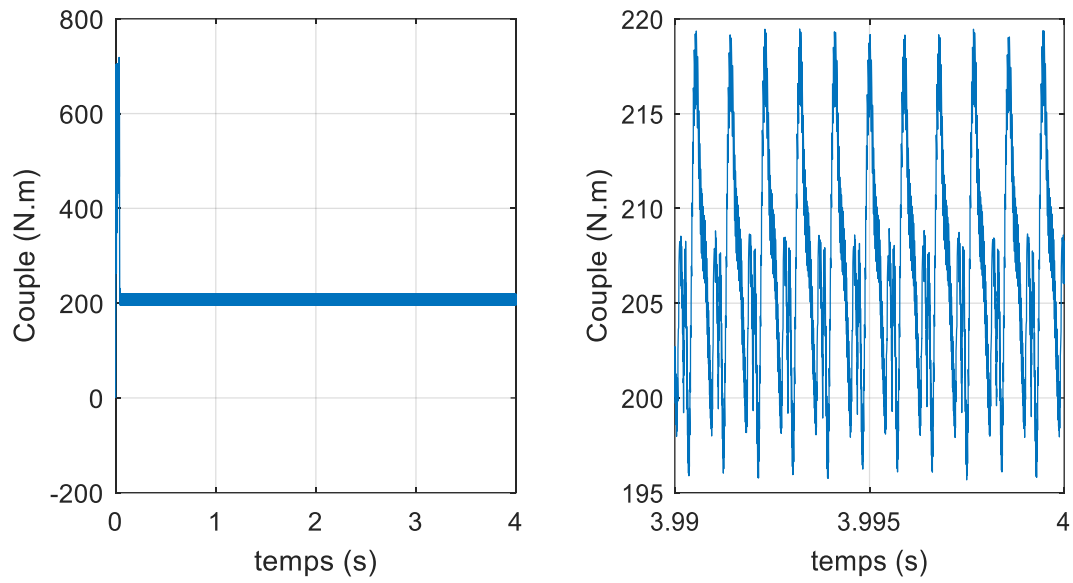
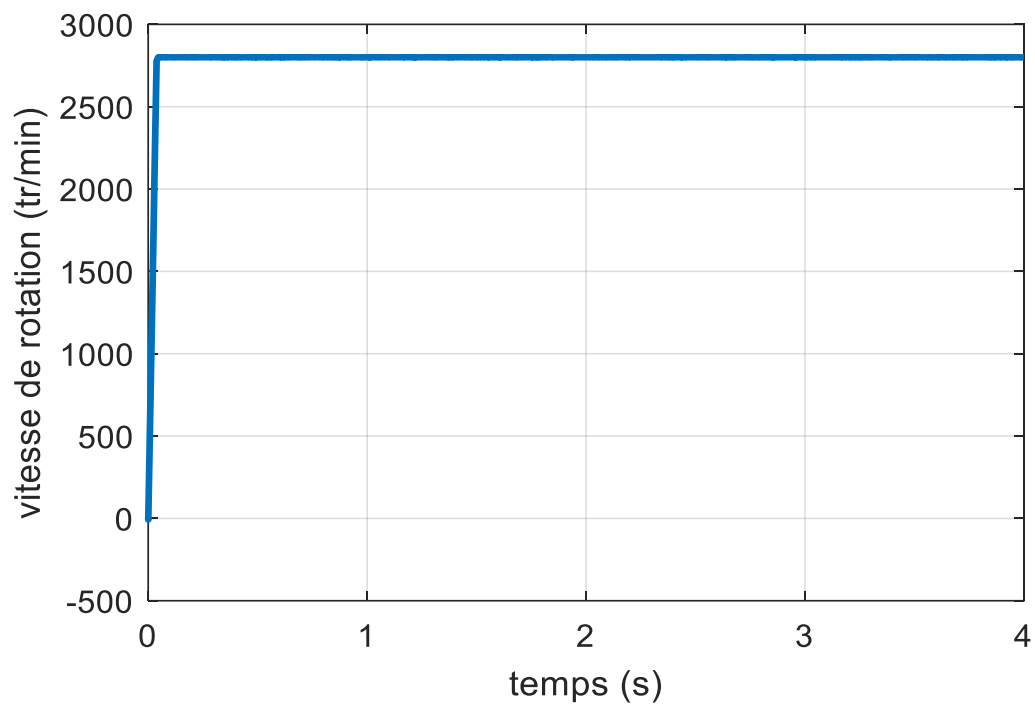


Figure III - 27 : Vitesse de rotation en fonction du temps

c) Fonctionnement en charge

Les figures (III.28, III.29, III.30 et III.31) illustrent l'impact de la régulation floue (FLC) sur les grandeurs caractéristiques du système, notamment la vitesse, le couple, les flux et les courants. Grâce à cette commande, la vitesse et le couple suivent précisément la consigne, assurant une transition fluide et minimisant les fluctuations. L'adaptabilité de la logique floue permet d'optimiser la réponse dynamique du moteur, garantissant ainsi la robustesse de cette régulation face aux variations de charge et aux perturbations du système.

**Figure III - 28 :** Courant des phases en fonction du temps**Figure III - 29 :** Flux magnétique en fonction du temps

**Figure III - 30 :** Couple en fonction du temps**Figure III - 31:** Vitesse de rotation en fonction du temps

C) Inversion de sens de rotation

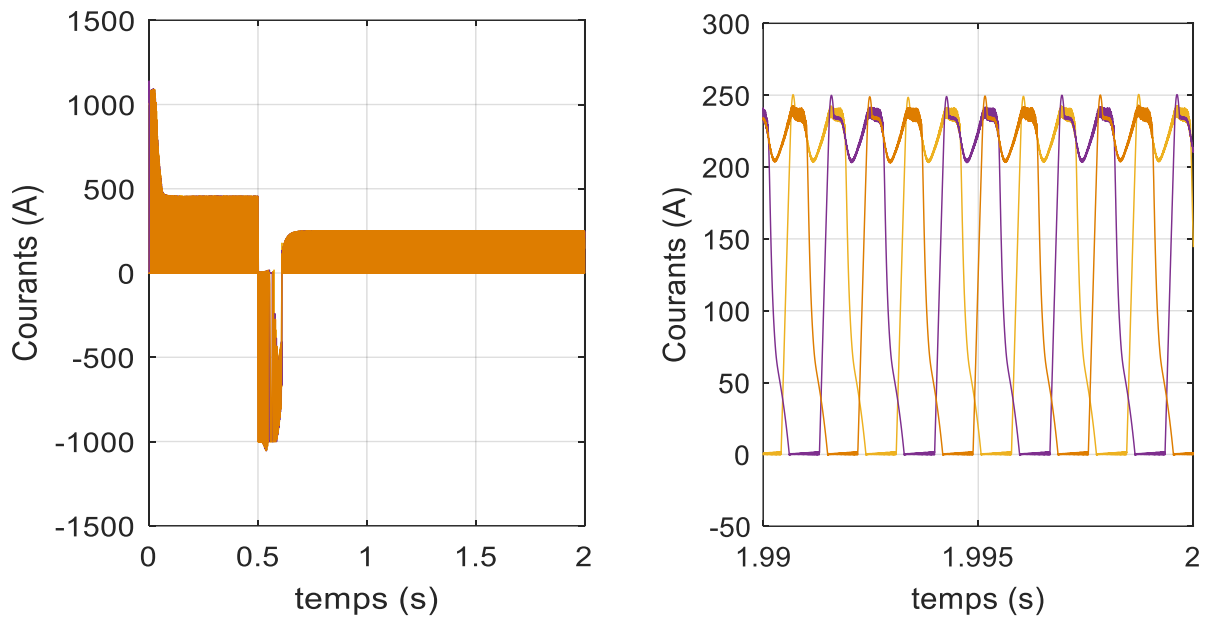


Figure III - 32 : Courant des phases en fonction du temps

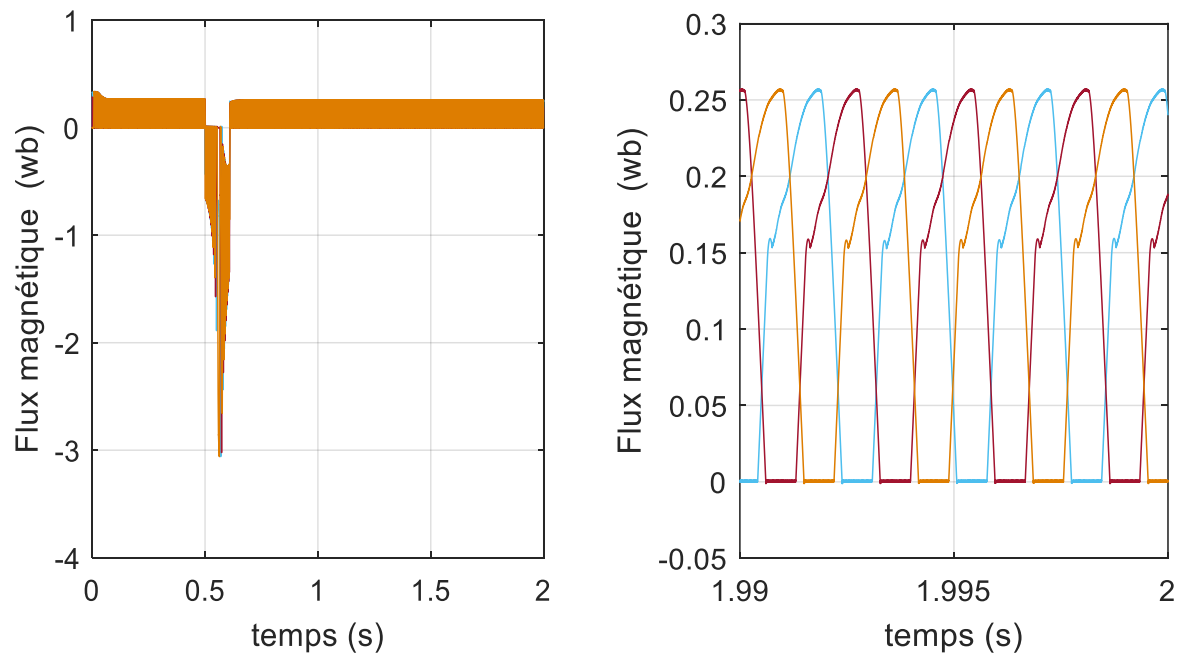


Figure III - 33 : Flux magnétique en fonction du temps

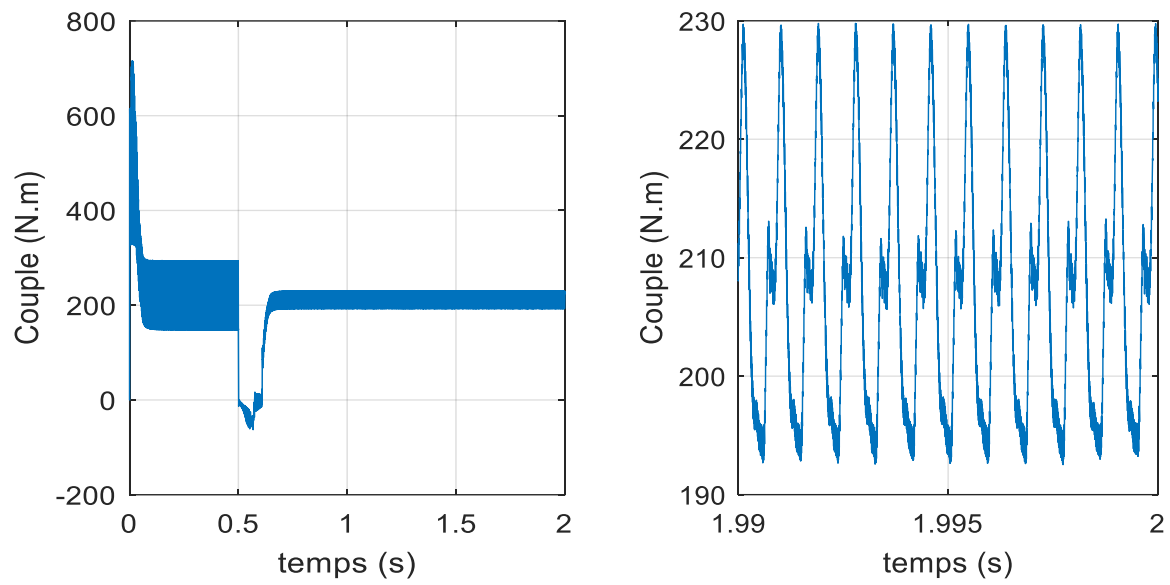


Figure III - 34 : Couple en fonction du temps

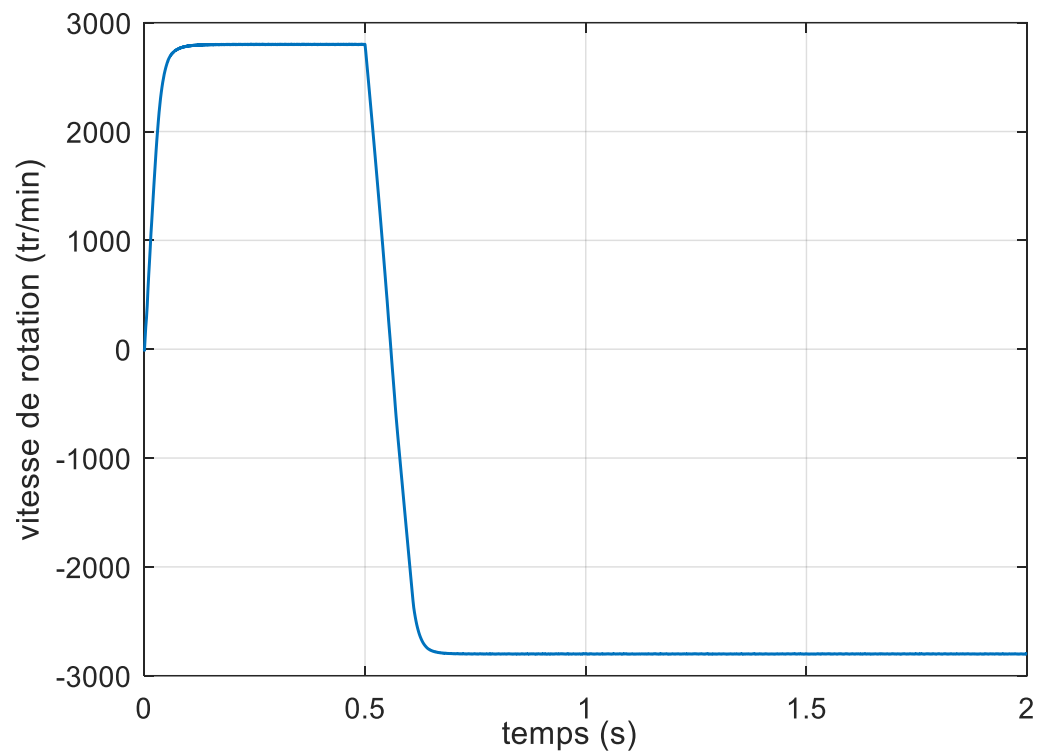


Figure III - 35 : Vitesse de rotation en fonction du temps

III.4 Analyse comparative de la régulation PI et FLC pour la MRV 24/16

III.4.1 Ondulation de couple

La commande par logique floue (FLC) joue un rôle déterminant dans l'optimisation du contrôle du couple des machines électriques. Son approche adaptative permet une réduction significative de l'ondulation du couple, améliorant ainsi la stabilité du moteur et minimisant les pertes énergétiques.

Dans les résultats obtenus, la commande FLC se distingue par une régulation plus fluide et plus robuste par rapport aux autres stratégies. Après une surimpulsion initiale atteignant environ 700 N.m, le moteur stabilise progressivement son couple autour de 207 N.m, avec des variations réduites et une meilleure réactivité aux perturbations.

Sans commande, le couple présente des oscillations importantes et une convergence lente, rendant la performance imprévisible. L'introduction d'une régulation PI améliore la stabilité, mais au prix d'une forte surimpulsion initiale atteignant près de 800 N.m, ce qui peut poser des problèmes dans des applications sensibles aux vibrations mécaniques. En revanche, la commande FLC permet une stabilisation plus efficace, réduisant les fluctuations excessives et offrant une meilleure précision du contrôle, optimisant ainsi le rendement énergétique du système.

Tableau III -1 : Taux d'ondulation au régime permanent

	Sans commande	PI	FLC
Taux d'ondulation	78,4%	43,9%	9,5 %

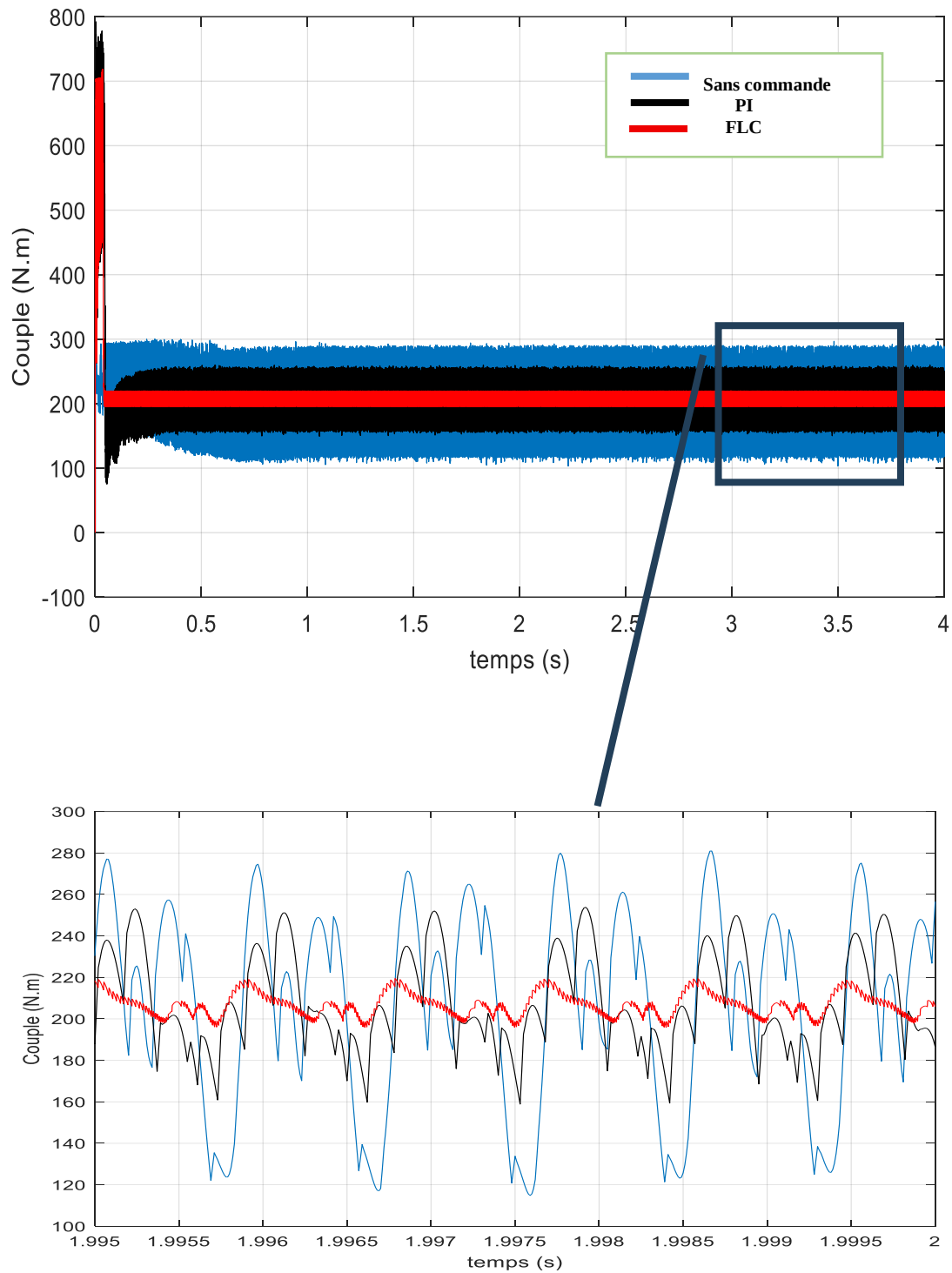


Figure III – 36 : Couple électromagnétique avec et son régulateur PI, FLC

III.4.2 Régulation de vitesse

Selon la figure III.37, la commande par logique floue présente une montée vers la consigne plus progressive, avec une réduction significative des fluctuations et une meilleure gestion des non-linéarités du système. Elle assure une régulation précise, sans dépassement ni variations indésirables, ce qui témoigne d'un contrôle adaptatif efficace, capable d'atténuer les perturbations et d'optimiser le fonctionnement global. En revanche, le régulateur PI provoque un démarrage avec dépassement (~ 3500 tr/min), révélant une surcompensation au début. La vitesse chute ensuite rapidement avant de se stabiliser autour de 2800 tr/min. Bien que la régulation soit correcte, le dépassement initial peut engendrer des oscillations ou des risques d'instabilité si le système n'est pas finement ajusté.

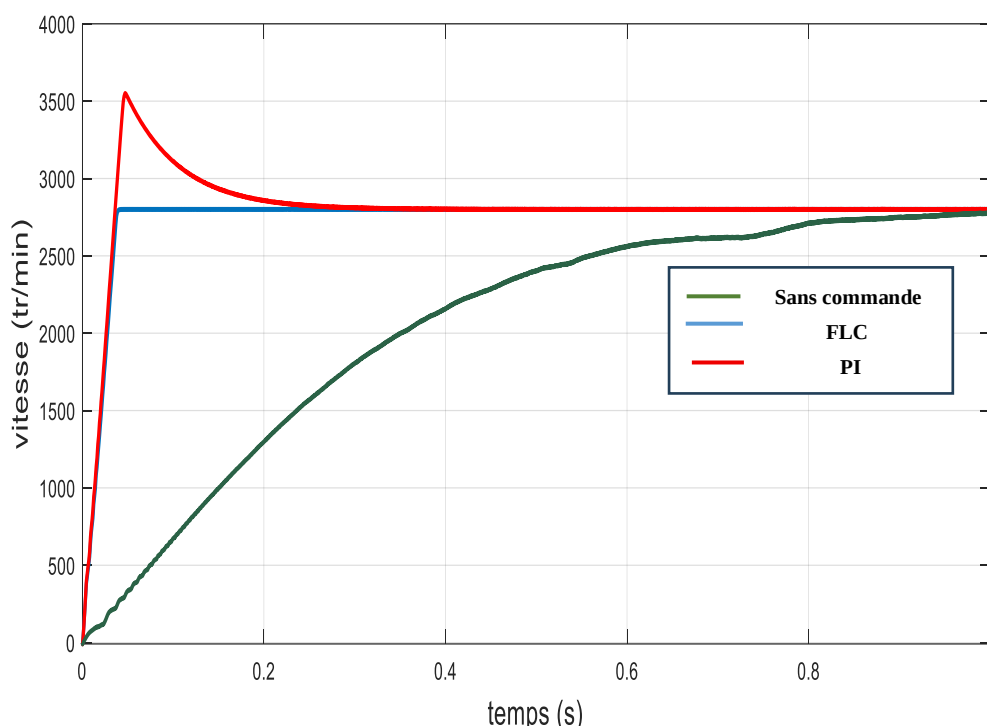


Figure III - 37 : Réponse de vitesse sans et avec commande PI, FLC

III.5 Cycle de conduite WLTC

Le cycle de conduite WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) est une norme conçue pour évaluer avec plus de précision la consommation de carburant et les émissions des véhicules légers, remplaçant l'ancien cycle NEDC jugé peu représentatif des conditions réelles de conduite. Ce cycle dure environ 30 minutes, avec une distance parcourue de 23,25 km, soit plus du double du NEDC, et inclut des phases de conduite réalistes : basse vitesse (zone urbaine), vitesse modérée (routes secondaires), vitesse élevée (routes rapides) et très haute vitesse (autoroutes), atteignant une vitesse maximale de 131 km/h contre 120 km/h pour le NEDC. Il intègre des accélérations plus réalistes, comme un 0 à 50 km/h en 14 secondes, contre 26 secondes précédemment, offrant ainsi des résultats plus proches des conditions de circulation réelles. Contrairement au NEDC, le WLTC prend en compte les variations de vitesse fréquentes, les arrêts et l'impact de dispositifs comme la climatisation, ce qui permet une estimation plus fidèle des performances énergétiques et des émissions. Son adoption améliore l'évaluation des véhicules, notamment électriques et hybrides, en fournissant des données plus pertinentes pour la transition vers une mobilité durable.

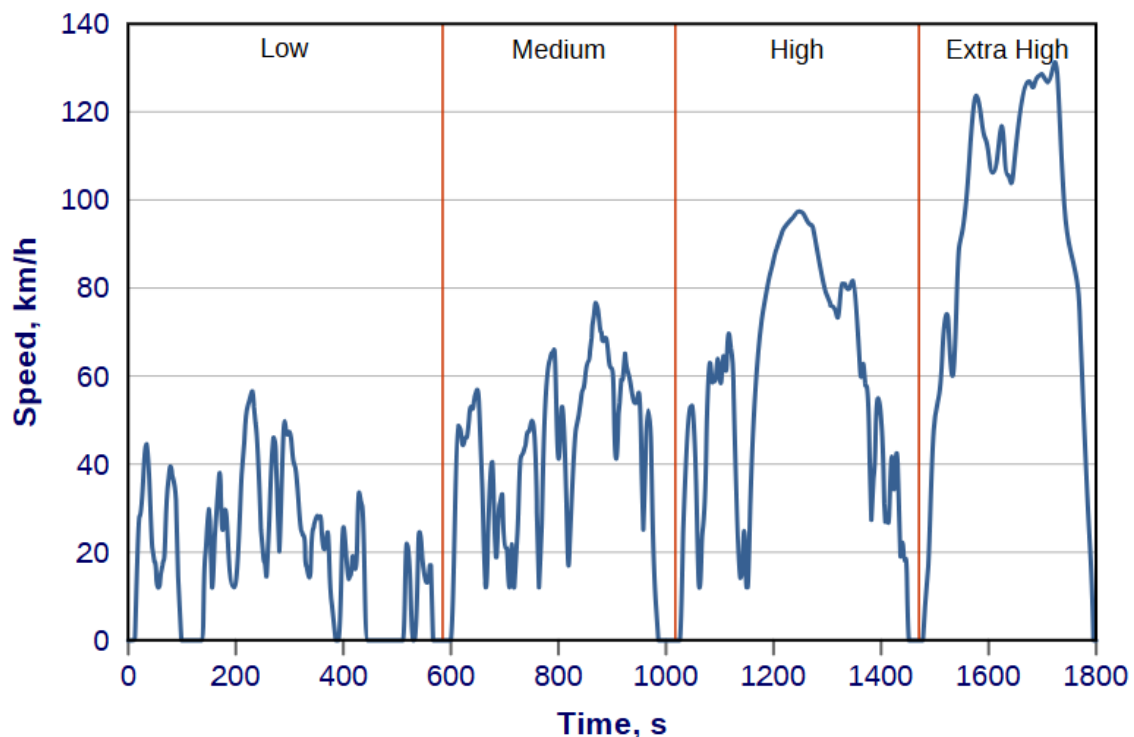


Figure III - 38 : Cycle européen de conduite WLTC

III.5.1 Résultats de la simulation

Nous appliquons le profil de vitesse de référence pour un véhicule suivant un cycle représenté sur la Figure III.39 à l'aide de bloc « *signal Builder* ». Ce cycle de conduite est très utile pour tester les performances du véhicule électrique dans les différents phases (urbain, routier et autoroutier, etc...). On remarque que la variation de la pédale d'accélération suit parfaitement le changement du profil de la route, ce qui permet d'améliorer les performances énergétiques du véhicule.

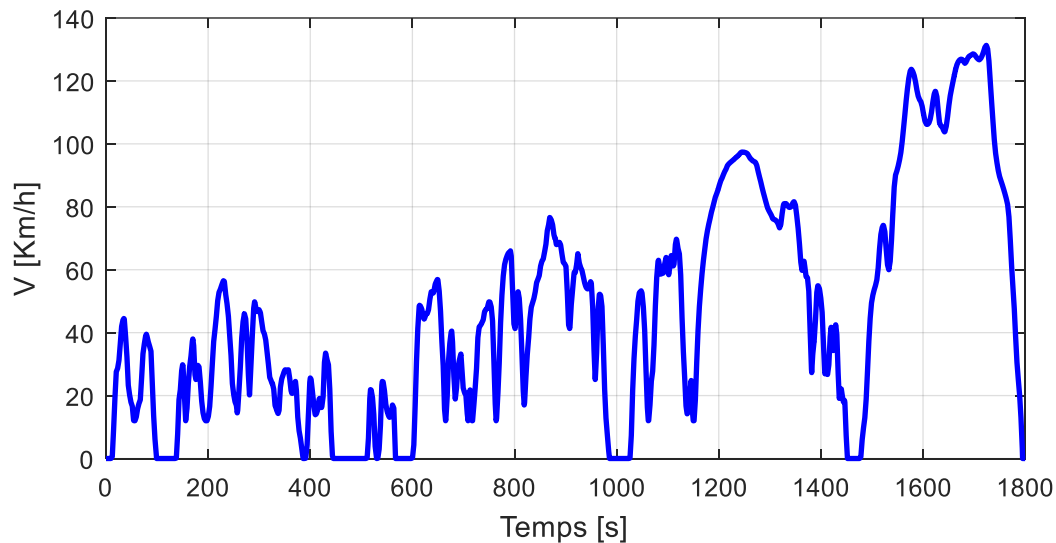


Figure III - 39 : Profil de vitesse de référence selon WLTC

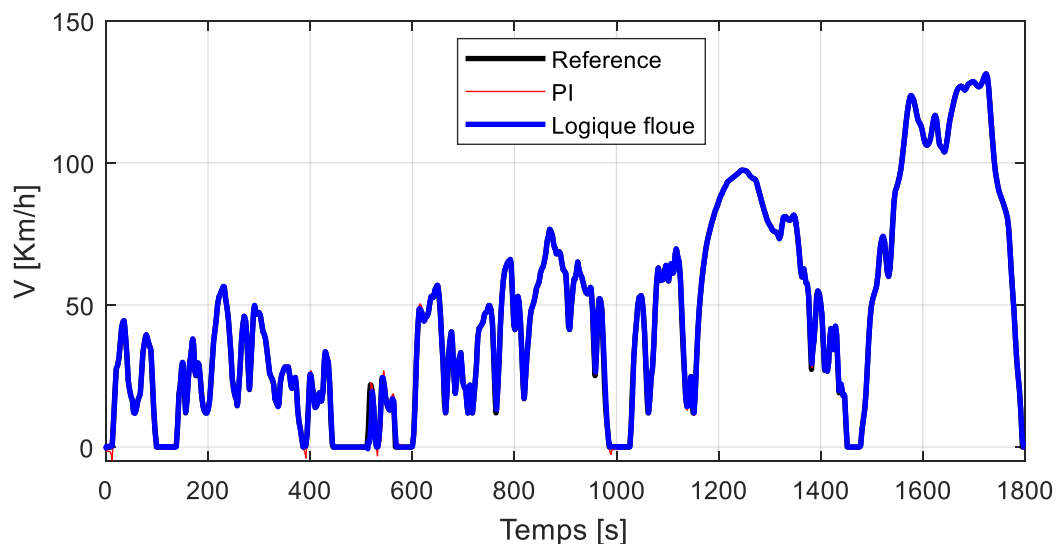


Figure III - 40 : Vitesse linéaire du MRV en Km/h

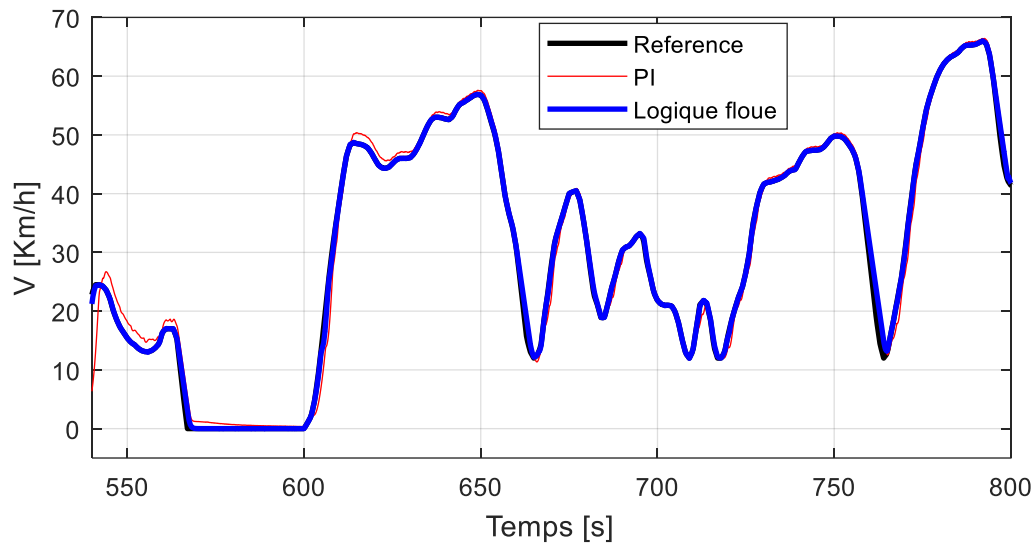


Figure III - 41 : Zoom de vitesse linéaire du MRV en Km/h

III.6 Conclusion

En résumé, ce chapitre a exploré la régulation de vitesse de la MRV 24/16, comparant les performances du régulateur PI et du régulateur flou (FLC). Une stratégie de commande à hystérésis a été mise en œuvre pour le contrôle des courants, garantissant une meilleure gestion de la dynamique du moteur. Les résultats obtenus confirment l'efficacité des approches adoptées et leur pertinence pour une optimisation robuste du système.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, un moteur à réluctance variable (MRV) a été étudié et proposé comme solution de traction pour un véhicule hybride, en prenant comme référence la Toyota Prius 2010. Les performances du MRV, notamment son couple, sa vitesse et son rendement, ont été analysées, en parallèle avec la présentation de sa géométrie et de ses paramètres clés. Un modèle MRV 24/16 a été spécifiquement développé afin de reproduire le profil couple-vitesse du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) de la Prius, tout en respectant les contraintes géométriques imposées par le diamètre extérieur du stator et la longueur axiale.

Le deuxième chapitre a détaillé le processus de conception et de simulation d'un MRV 24/16 de 60 kW destiné à remplacer le moteur d'origine de la Prius. La validité de cette alternative a été confirmée grâce à des analyses par éléments finis effectuées avec le logiciel Simcenter MotorSolve, ainsi qu'à travers des simulations dynamiques sous Matlab/Simulink. Les résultats montrent que le MRV reproduit efficacement les caractéristiques du MSAP, tout en maintenant un rendement compétitif sur l'ensemble de sa plage de fonctionnement.

Enfin, le troisième chapitre s'est focalisé sur la commande du MRV à l'aide d'un régulateur PI et d'un contrôleur à logique floue. Les simulations ont mis en évidence que la commande floue offre une réponse plus stable, rapide et sans dépassement, contribuant à une amélioration significative du comportement dynamique du moteur. Cette approche s'avère également efficace pour atténuer les effets des non-linéarités et réduire les ondulations du couple, renforçant ainsi les performances globales du système de traction proposé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] V. Mester, Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique, Thèse de doctorat, Ecole central de Lille, Mai 2007

[2] H. Benariba, Contribution à la commande d'un véhicule électrique, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Décembre 2018.

[3] KADA BELGHITRI NAOUEL, Contribution à la modélisation par la méthode des réseaux de reluctances (MRR) d'une machine à réluctance variable, Thèse de Doctorat, U.S.T.O Oran 2015

[4] Slah Farhani, « Conception et réalisation des convertisseurs de puissance dédiés aux véhicules électriques ». Thèse de doctorat, Université de Tunis, 2019

[5] Yipeng Wang, B.Eng. Switched Reluctance Motor Analysis and Design for a Lunar Roving Vehicle, mémoire de master engineering. McGill Université Montreal, Quebec, Canada, 2013.

[6] James WeishengJiang. «THREE-PHASE 24/16 SWITCHED RELUCTANCE MACHINE FOR HYBRID ELECTRIC POWERTRAINS: DESIGN AND OPTIMIZATION». Thèse de doctorat, McMaster University, Canada, 2015.

[7] L. Moreau, « Modélisation, Conception et Commande de GRV» , Thèse Doctorat, Univ. Nantes, 9 Dec 2005.

[8] Kolomeitsev, D. Kraynov, S. Pakhomin, F. Rednov, E. Kallenbach, V. Kireev, T. Schneider, and J. Böcker, « Linear switched reluctance motor as a high efficiency propulsion system for railway vehicles, Proc.International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Ischia, pp. 155-160, 2008.

[9] Lazreg Mohamed Oussama, « étude d'un véhicule hybride photovoltaïque biodiesel» Mémoire d'Ingénieur, école supérieure en sciences appliquées, Université de Tlemcen,le 09/2020

[10] Mert Mokukcu, « Optimisation énergétique d'un véhicule hybride ». Université Paris saclay, France, 2018.

[11] Oulad Naoui Brahim el khalil, « Conception et simulation d'une machine a réluctance variable triphasé utilise dans un véhicule électrique hybride » Mémoire du master , Université de OUARGLA,2022.

[12] Guidoum Fatima, et Didi Hiba, « Modélisation d'une machine à réluctance variable de type « 6/4 » par la méthode numérique des éléments finis » Mémoire du master, Université Larbi Ben M'hidi Oum EL Bouaghi, 2009.

[13] Rabah Redjem, « Modélisation et Optimisation d'une Structure de Machine à Réluctance Variable Dédiée aux Energies Renouvelables » Thèse de doctorat, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2010

[14] Sihem Mouellef, « Contribution à l'étude d'une machine à reluctance variable : Conception, modélisation & simulation d'une MRVDS 6-4 ». Thèse de magister en électrotechnique, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008

[15] S. SARRAY.' « Étude et simulation d'une commande directe de couple pour l'entraînement électrique d'une machine asynchrone ». Thèse de maitrise en génie de la production automatisée M.ING doctorat Montréal/ décembre 2000.

[16] Guettaf Abderrazak, « Contribution à la conception de la machine à réluctance variable en vue de sa commande » Thèse de magister en électrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra, 2005.

[17] LMAHMOUD, H.REHAOULIA and M.AYADI, Design and modeling of a linear switched reluctance actuator for biomedical applications, International Journal of Physical Sciences, Vol.6(22), pp. 5171-5180. October 2011.

[18] Banumathi S et Jeyapriya M, «Fuzzy logic based speed control technique for switched reluctance motor» journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences ISSN: 0974-2115 , 1:February 2017

[19] RANGLAL Kilaina, «Advanced control methods for torque ripple reduction and performance improvement in switched reluctance motor drives » Thèse de doctorat, Central supelec, france, 2014

[20] Bernard. Multon, Conception et alimentation électronique des machines à reluctance variable à double saillance», Habilitation, INS Cachan, 17 Mai 1994.