



Faculté : Sciences de l'ingénierie
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Commande par la Logique Floue de la Machine à Réductance Variable à
Commutation Electronique (MRVCE) pour la Traction des Véhicules
Electriques Légers**

Présenté par :

- *Chenouf Abdallah*
- *Gafsi Houssef eddine*

Encadré par:

- *D^r Ghoudelbourk Sihem* Grade MCA BADJI Mokhtar – Annaba

Jury de Soutenance :

Dr. Meghni Billel	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
Dr. Ghoudelbourk Sihem	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadré
Dr. Mihoub Mouhammed Larbi	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Résumé :

Le domaine de la traction électrique a suscité un très grand intérêt dans ces dernières années. Une amélioration substantielle des performances électromagnétiques et énergétiques de la traction électrique doit être faite avant que les véhicules électriques puissent substituer les véhicules équipés de moteurs à combustion interne. Le choix du moteur à réluctance variable à commutation électronique (MRVCE) comme solution de traction électrique légère est justifié par sa construction simple, sa fiabilité élevée, son bas prix de construction et son poids réduit ; mais la commande de ce type de machine soulève un certain nombre de contraintes, parmi lesquelles on peut citer : l'ondulation du couple et le bruit acoustique, qui sont les deux principaux inconvénients du MRV. Pour remédier à ces contraintes nous proposons une étude d'un MRVCE 8/6 pôles, commandé par la technique de contrôle direct du couple dite DTC (Direct Torque Control), sans capteur de position de vitesse et des régulateurs à techniques intelligentes assurant l'entraînement à vitesse variable pour réduire à la fois l'ondulation du couple et diminuer les effets de bruit acoustique.

Mots clés : Machine à réluctance variable à commutation électronique(MRVCE), Contrôle direct du couple(DTC), Logique flou (FLC).

Abstract:

The field of electric traction has aroused great interest in recent years. A substantial improvement in the electromagnetic and energy performance of the electric traction assembly must be made before electric vehicles can replace vehicles equipped with internal combustion motors. The choice of electronically commutated switched reluctance motor with electronic commutation (SRMEC) as the electric traction solution is justified by its simple construction, high reliability, low construction cost, and reduced weight; but the control of this type of machine raises a number of constraints, among which include: torque ripple and acoustic noise, which are the two main drawbacks of SRM. To overcome these constraints we propose a study of an SRMEC 8/6 pole, controlled by the technique of direct torque control (DTC) without speed position sensor and intelligent regulators providing variable speed drive to both reduce torque ripple and decrease acoustic noise effects.

Keywords: switched reluctance motor with electronic commutation (SRMEC), direct torque control (DTC), fuzzy logic control (FLC).

ملخص:

أثار مجال الدفع الكهربائي اهتمامًا كبيرًا في السنوات الأخيرة. توجب علينا إجراء تحسين كبير في الأداء الكهرومغناطيسي والطاقة لمجموعة الدفع الكهربائي قبل أن تتمكن السيارات الكهربائية من منافسة المركبات المزودة بمحركات الاحتراق الداخلي. إن اختيار محرك التردد المتغير القابل للتبديل إلكترونيًا (MRVCE) كحل سحب كهربائي خفيف الوزن له ما يبرره من خلال تركيبه البسيط للغاية والموثوقية العالية وسعر التصنيع المنخفض والوزن المنخفض، لكن التحكم في هذا النوع من الماكينات يرفع عددًا معينًا من القيود ، من بين والتي يمكننا الاستشهاد بها: تموج عزم الدوران والضوضاء الصوتية وهما من العوائق الرئيسية لمحرك ممانعة التبديل. لمعالجة هذه القيود، نقترح دراسة لمحرك التردد المتغير (MRVCE 8/6) ، يتم التحكم فيه بواسطة تقنية التحكم المباشر في عزم الدوران المعروفة باسم DTC (التحكم المباشر في عزم الدوران) بدون مستشعر في موضع السرعة والمنظم التقني. فقط باستخدام أنظمة ذكية تضمن محرك متغير السرعة لهذا الجهاز كل هذا لتقليل: تموج عزم الدوران وتقليل تأثيرات الضوضاء الصوتية.

الكلمات المفتاحية: محرك التردد المتغير القابل للتبديل إلكترونيًا (MRVCE) ، التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) ، المنطق الضبابي (FLC)

Dédicace

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

Je dédié ce modeste travail à mes très chers parents, à mon très cher
père tout ce

qu'il a fait pour moi, par leur soutien moral et matériel, leur
encouragement, pour ça patience.

A ma très chère mère celle qui m'a donné l'espoir , le courage, et
l'amour pour leur soutien moral et matériel, pour ça tendresse, et pour
l'encouragement qu'elle a me donnée pendant mon parcours, que dieu
tout puissant garde mes parents et les protège.

A mes très chères soeurs...

A mon frère Rida

A madame Ghoudelbourk Sihem

Et A Toute la promotion (2021) sans exception.

A tous Mes amis Surtout : houssem, samy , yahya et mohamed .

Abdallah

Dédicace

j'ai l'honneur de dédier ce modeste travail réalisé grâce à l'aide de
Dieu

Je dédié ce modeste travail à mes très chers parents.

A mon frère abdallah et Ma sœur imen

A Piko, samia et marwa et tout ma famille

A tous ceux que j'aime

Mon encadreur et mes collègues.

Houssem

Remerciement

En premier, nous remercions le bon dieu le tout puissant de nous
Avoir donné la santé, le courage et de la patience pour être ce que nous
Sommes aujourd'hui et pour mener à terme ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre
Encadreur Mme Goudelbourg Sihem pour ses précieuses orientations,
Son aide, ses conseils et son souci de réaliser ce travail de recherche,

Nous remercions aussi très sincèrement les membres de jury.
La présidente Dr. Maghni bilbel ainsi que l'examineur Dr. Mihoub

Mouhammed larbi .

D'avoir accepté d'examiner ce travail et de nous avoir
Honorées par leur présence le jour de la soutenance.

Liste des tableaux		
<i>N°</i>	Tableaux	<i>Page</i>
I.1	Temps de charge des batteries	15
I.2	Tableau comparatif des technologies des batteries	17
I.3	Comparaison des quatre machines de traction électrique	20
III.1	Sequences de conduction du convertisseur à demi-pont asymétrique	36
III.2	Sequences de conduction du convertisseur de Miller	37
III .3	Sequences de conduction du convertisseur à dissipation passive « R—Dump »	38
III .4	Comparaison des trois convertisseurs pour l'alimentation de la MRV	38
III .5	Avantages et inconvénients de chaque type du convertisseur	39
III .6	Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur V_i appliqué dans la zone Z_i	54
III .7	Tableau de localisation des vecteurs de tensions	54

Liste des figures		
N°	Figures	Page
I.1	Système d'entraînement d'un VE	3
I.2	Première voiture au monde	4
I.3	La jamais contente	4
I.4	La première voiture hybride	5
I.5	La Prius	5
I.6	La Nissan LEAF	6
I.7	La Renault ZOE	6
I.8	Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique	7
I.9	Principe de fonctionnement de la pile à combustible	9
I.10	Auto bus à pile à combustible	9
I.11	Véhicule hybride série	10
I.12	Véhicule hybride parallèle	11
I.13	Véhicule hybride combiné	11
I.14	Solution monomoteurs	12
I.15	Solution multi-moteurs	12
I.16	Moteur-roue	13
I.17	Structure de la chaîne de traction dans un VE	13
I.18	Déférentes types des batteries	16
I.19	Exemple de super condensateur	17
I.12	Composition d'un super condensateur.	17
I.20	Les volants d'inertie	18
II.1	Arbre génalogique des MRV	24
II.2	Constitution d'une machine à reluctance variable type MRV 8/6	24
II.3	MRV pur à gros dents	25
II.4	MRV à effet Vernier à stator externe et interne	26
II.5	MRV hybride	26
II.6	Structure MRV de base et position extrêmes du rotor	27
II.7	Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor	28
II.8	Positions d'opposition et de conjonction d'une MRV 8/6	29
II.9	Fonctionnement MRV 8/6 pôle	29
II.10	Caractéristique couple vitesse d'un moteur à reluctance variable	30
II.11	applications du MRV	31
II.12	Des applications spécifiques : compresseurs, ventilateurs, pompes. Les équipements médicaux	31
II.13	Des applications pour les véhicules électriques	32
II.14	Porte automatique utilisant de MRV	32

Liste des figures

III.1	La chaîne de traction du véhicule électrique	35
III.2	Schéma de la structure générale du convertisseur en demi-pont asymétrique	36
III.3	Schema de la structure générale du convertisseur de Miller	37
III.4	Schema de la structure générale du convertisseur a dissipation passive	38
III.5	Structure du contrôleur PI vitesse	40
III.6	Schéma bloc MRVCE contrôle de vitesse avec régulateur PI	41
III.7	Topologie de convertisseur en pont asymétrique pour machine à réluctance commutée 8/6 pôles Convertisseur de quatre phases	42
III.8	Etats de tension de phase du MRV	42
III.9	Parametre de regulateur PI	42
III.10	Réponse en vitesse par les régulateurs PI	43
III.11	Réponse des courants de la phase A et B et C et D par les régulateurs PI	43
III.12	Réponse en courant de la phase A par les régulateurs PI	44
III.13	Couple par régulation avec régulateurs PI	44
III.14	Contrôle de vitesse de MRV avec PI	45
III.15	Couple da MVR avec contrôle de vitesse avec PI	45
III.16	Schéma structurel d'une commande DTC appliquée à une MRV	46
III.17	Définition de - axe pour la tension du moteur	47
III.18	Définition des vecteurs de tension du moteur MRV pour DTC	48
III.19	Réglage de vitesse d'un véhicule selon la logique classique	50
III.20	Exemple de réglage de vitesse d'un véhicule selon la logique floue	52
III.21	Schéma des différentes opérations dans un bloc logique floue	53
III.22	Schéma fonctionnel du DTC	54
III.23	Bloc de sélection des secteurs d' après la position de couple et de flux	55
III.24	Bloc de contrôle de vitesse par le régulateur FLC	55
III.25	Image de Flux	55
III.26	Image des courant	56
III.27	Contrôle de vitesse de MRV avec DTC et logique floue	56
III.28	Couple de MRV avec DTC et logique floue	56

Notions et Symboles

MRV	Moteur réductance variable
DTC	Commande directe du couple
R	Résistance d'une phase statorique
L	Inductance d'une phase statorique
K	Coefficient du couple et de la force électromotrice
N _s	Dents au stator.
N _r	Dents au rotor.
N	La vitesse.
T	Période.
W _e , W _c	l'énergie et la coénergie électromagnétiques.
P _j	Perméance du circuit magnétique par phase.
m	Nombre de phase.
F	Fréquence de rotation.
Ω	Vitesse angulaire de rotation.
J	Moment d'inertie du rotor.
F	Coefficient de frottement.
C _r	Couple de charge.
M ₁₂ , M ₁₃	Inductances mutuelles.
Θ _{on}	L'angle d'amorçage.
Θ _{off}	L'angle de blocage.
Θ _c	L'angle de conduction.
Θ _d	L'angle de démagnétisation ou l'angle d'extinction.
V _k	La tension à la borne de phase
I _k	Le courant traversant la phase
R	Résistance de la phase
T _e	Couple électromagnétique
ω _r	Vitesse de rotation
ω _n	La pulsation naturelle
ξ	Le coefficient d'amortissement
K _p	Les gains proportionnel
θ	Position angulaire du rotor par rapport au stator
L _k	Inductance de la phase
T _L	Couple de charge
J	L'inertie
B	Coefficient de frottement
Φ _k	L'écoulement dans le pôle du stator
dW _m	L'énergie mécanique différentielle
dW _f	L'énergie de champ
ψ(θ, i)	La fonction non linéaire

SOMMAIRE

ملخص

ABSTRACT

RESUME

Introduction Générale

1

Chapitre I

L'état de L'art des Véhicules Electrique

I.1	Introduction	3
I.2	La voiture électrique	3
I.3	Historique	4
I.4	Actualités des véhicules électriques	6
I.5	Fonctionnement d'un véhicule électrique	7
I.6	Classification des véhicules électriques	8
	I.6.1 Véhicules tout électrique (VTE)	8
	I.6.2 Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant	8
	I.6.3 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible	8
	I.6.4 Véhicules hybrides	10
	I.6.5 Véhicules hybrides série	10
	I.6.6 Véhicule hybride parallèle	11
	I.6.7 Véhicule hybride combiné	11
I.7	Les différentes configurations des véhicules électriques	12
	I.7.1 Véhicules électriques mono moteur	12
	I.7.2 Véhicules électriques multi-moteur	12
I.8	Description générale de la chaîne de traction	13
I.9	L'électronique de puissance dans le véhicule électrique	14
	I.9.1 Les onduleurs (DC-AC)	14
	I.9.2 Les hacheurs (DC-DC)	14
	I.9.3 Le chargeur	15
I.10	Diverses sources d'énergie électrique	15
	I.10.1 La batterie	
	I.10.2 Les super condensateurs	17
	I.10.3 Les volants d'inertie	18
	I.10.4 Les moteurs électriques utilisés pour les voitures électriques	18
I.11	Avantages et inconvénient des véhicules électriques	20
	I.11.1 Avantages	20

	I.11.2	Inconvénients	21
I.12	Conclusion		22
Chapitre II			
Généralités sur les MRV			
II.1	Introduction		23
II.2	Classification des MRV		23
II.3	Topologies des MRV tournantes		24
	II.3.1	Les MRV purs	25
	II.3.2	Les MRV à effet vernier	25
	II.3.3	Les MRV hybrides	26
II.4	Choix de la structure		26
II.5	Principe de fonctionnement du MRV		27
	II.5.1	Fonctionnement en moteur	29
	II.5.2	Caractéristique couple vitesse	30
II.6	Les applications du MRV		30
II.7	Avantages et du MRV		33
	II.7.1		33
	II.7.2		34
	conclusion		34
Chapitre III			
Commande du MRVCE			
III.1	Introduction		35
III.2	Alimentation de la Machine à Réductance Variable		35
	III.2.1	Convertisseurs en demi-pont asymétriques	36
	III.2.1	Convertisseur de Miller (Topologie m+1)	36
	III.2.1	Convertisseur a dissipation passive « R—Dump »	37
	III.2.1	Comparaison des trois convertisseurs pour l'alimentation de la MRV	37
	Commande classique PI		38
III.3	Résulta de la simulation de la MRV avec contrôle PI		39
III.4	Problématique		41
III.5	Principes généraux de la DTC		46
	III.5	Contrôle de flux statorique et du couple électromagnétique	47
III.6	Logique Floue		52
III.7	Résultats la commande DTC de la MRVCE avec contrôle de vitesse par des régulateur		55
III.8	Conclusion		56
Conclusion Générale			58

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La réduction de la consommation des hydrocarbures et par conséquent les émissions polluantes dans le secteur automobile est un enjeu important, et le marché du véhicule propre s'ouvre donc de plus en plus. Ainsi, la nécessité de rendre les automobiles plus propres, conjugué au besoin naissant d'un nouveau type de consommateur de ce secteur, pousse les constructeurs à proposer des véhicules plus sobres[1]. Une solution, qui permet d'éviter la consommation de pétrole pour ce type d'application et de ne plus émettre de gaz à effets de serre notamment dans les milieux urbain.

Cependant, le passage d'un parc automobile mondial fonctionnant actuellement quasi-exclusivement au pétrole, vers un parc d'automobiles exclusivement électriques, ne peut être réalisé directement. Il faut en effet respecter certaines contraintes industrielles et économiques incontournables. Le passage du véhicule conventionnel au véhicule électrique est donc un travail à réaliser pas à pas, en partant des technologies bien maîtrisées actuellement[2].

Ce secteur va donc entraîner dans les années à venir une activité importante des constructeurs en termes de recherche et de développement car de nombreuses solutions apparaissent et doivent faire leurs preuves. Aujourd'hui, des nombreux systèmes de gestion de l'énergie ont été définis pour les véhicules électriques. Mais il existe encore de nombreuses opportunités pour renforcer[3], simplifier les architectures électriques et améliorer l'adéquation entre le véhicule et son infrastructure de charge.

La machine à réluctance variable peut réunir toutes les qualités pour convaincre les industriels dans le domaine de construction des voitures électriques étant donné qu'elle ne nécessite pas d'aimants permanents dans sa construction aussi par sa robustesse et son faible cout et également elle est de conception très simple et intrinsèquement tolérante aux défauts grâce à sa redondance. Toutefois, cette machine présente deux inconvénients principaux; une ondulation du couple importante et la génération d'un bruit acoustique élevé[4].

L'objectif de cette étude consiste principalement à intégrer une machine à réluctance variable à quatre phases de type 8/6 pôles dans la chaîne de traction du VE. Pour assurer un fonctionnement sûr et améliorer les performances de la chaîne de traction, nous allons proposer une étude d'un Moteur à Reluctance Variable à commutation électronique (MRVCE) 8/6, commandé par la technique de contrôle direct du couple dite DTC sans capteur de position et de vitesse et des régulateurs à techniques intelligentes assurant l'entraînement à vitesse variable de cette machine à la fois pour réduire l'ondulation du couple et diminuer les effets de bruit acoustique.

Dans le premier chapitre, nous commencerons par un état de l'art des véhicules électriques. Nous expliquerons leurs fonctionnements et nous éluciderons les facteurs essentiels qui favorisent le choix du moteur à reluctance variable comme moteur de traction[5].

Le deuxième chapitre présente les notions de base sur les machines à reluctance variable et leur modélisation et principe de fonctionnement est les applications de MRV et leurs avantages et inconvénients.

Dans le troisième chapitre nous proposons une commande de la machine MRVCE basée sur une stratégie de régulation en cascade vitesse/courants à base de régulateurs classiques du type PI. La synthèse de ces lois de commande conventionnelles pour la commande de la machine à reluctance variable fournit de bonnes propriétés. Néanmoins, elles ne peuvent pas garantir de hautes performances et robustesse dans le contexte d'applications aux véhicules électriques où celles-ci sont cruciales et étant donné que cette technique de commande requiert l'installation d'un capteur mécanique afin d'obtenir l'information sur la vitesse du rotor. La présence de ce capteur entraîne une complexité de commande. Pour des raisons économiques et/ou de sûreté de fonctionnement, plusieurs études ont été élaborées afin de supprimer ce capteur [6]. Ces études ont fait apparaître des différentes méthodes de la commande sans capteur de vitesse. Elles sont toutes fondées sur l'utilisation de certaines variables électriques (courants et tensions) pour estimer la vitesse de rotation. La commande sans capteur est devenue maintenant plus en plus attractive, présente l'intérêt économique, améliore la fiabilité et évite la fragilité et la difficulté d'installation du capteur de vitesse.

La deuxième partie du 3^{ème} chapitre concerne une étude d'une commande sans capteur mécanique d'un MRV8/6 et des régulateurs à techniques intelligentes (logique flou) assurant l'entraînement à vitesse variable de cette machine à la fois pour réduire : l'ondulation de couple et diminuer les effets de bruit acoustique.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus, des recommandations et des suggestions sur les travaux futurs.

CHAPITRE I

L'état de L'art des Véhicules Electriques

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.

Les véhicules électriques (VE) et hybrides 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) [6]. Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art de 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 - La voiture électrique

La voiture électrique a la particularité d'être entraînée par un ou plusieurs moteurs électriques qui transmettent la force motrice aux roues par un système de transmission adéquat. Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à des problèmes communs : la production, le stockage et l'utilisation de l'électricité. Le système d'entraînement est l'organe principal du VE, il est actionné par un ou plusieurs moteurs électriques et comporte un système de transmission conçu pour entraîner deux ou quatre roues motrices [7].

L'architecture est très simple. Elle est constituée d'un actionneur électrique, un dispositif de transmission, et des roues (voir figure I.1).

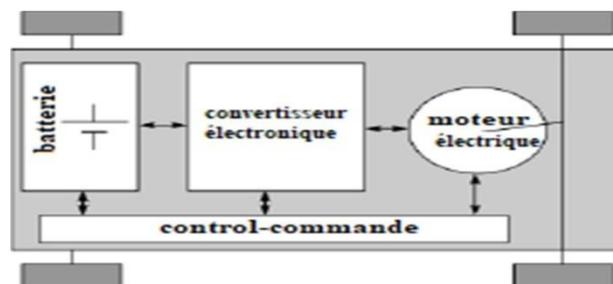


FIG I.1 – Système d'entraînement d'un VE

I.3 - Historique

La voiture électrique, que l'on présente d'ailleurs comme « la solution » au problème de la pollution des gaz d'échappement, n'est pas une idée qui date d'hier. A la fin du 19ème siècle, au début de l'automobile, plusieurs modes de propulsion étaient en compétition (le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique) [8]. Ci-dessous on compte les véhicules électriques qui ont marqué l'histoire.

- Dans les années 1830 (1832-1839), le premier véhicule électrique fit son apparition. L'homme d'affaires écossais Robert Anderson fut la première personne à avoir inventé une voiture électrique. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique.

- Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique.

- Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h.

- En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881.

- En 1884, Thomas Parker assis dans la première voiture électrique au monde. (Voir figure I.2).



FIG I.2 – Première voiture au monde

- En 1899 en Royaume-Uni, La Jamais Contente, la première voiture électrique qui a dépassé les 100 km/h a été construite [8]. La voiture était pilotée par le Belge Camille Jenatzy et elle était en forme de torpille (Figure I.3).

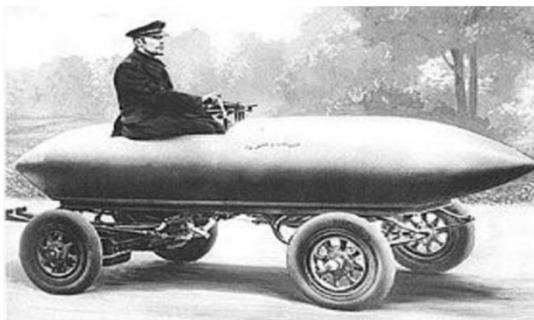


FIG I.3 – La jamais contente

- Dès 1900, la voiture électrique a connu ses beaux jours. En circulation, plus que le tiers des voitures sont électriques et le reste étant des voitures à essence et à vapeur.
- Dans les années 1920, certains facteurs comme la faible autonomie, la vitesse trop basse, le manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et le prix deux fois plus élevé que celles à essence, ont mené au déclin de la voiture électrique.
- En 1972, Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (Général Motors) (Voir figure I.4).



FIG I.4 – La première voiture hybride.

- En 1976, « the Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act » a été adopté par le Congrès américain, qui a permis de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides.
- Dès 1988, la société automobile Général Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998.
- En 1997, Toyota lance la Prius (Voir figure I.5), la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride [9].



FIG I.5 – La Prius

- De 1997 à 2000, de nombreux modèles électriques hybrides ont été lancés : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.

Cependant à partir de 2000, la voiture électrique va ré-mourir à nouveau. En 2004, c'est la fin de l'EV1, GM va récupérer tous les véhicules EV1 pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation. Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés Pétrolières.

- En Juillet 2009, La Mitsubishi i-MiEV a été lancée au Japon pour les professionnels, et en Avril 2010 pour les clients individuels, puis on a commencé à la vendre au public Hongkongais en mai 2010.

- En décembre 2010, La Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family car) la voiture électrique à cinq places annoncées qui a été déjà annoncé en 2009, a pu être commercialisée au Japon et aux Etats-Unis et en arrivant aux marchés européens la fin 2011 (Voir figure I.6)



FIG I.6 – La Nissan LEAF

- Aujourd'hui, le véhicule électrique est devenu une réalité. Les principaux constructeurs automobiles, à l'image de Renault avec la ZOE (Figure I.7) en 2013, ont développé un modèle 100% électrique et non un seul véhicule électrifié. Les installations de bornes de recharge sont aujourd'hui de plus en plus nombreuses [5].



FIG I.7 – La Renault ZOE

I.4 - Actualités des véhicules électriques

A l'heure actuelle, l'autonomie de l'ensemble des VE proposés par les constructeurs comprennent des batteries qui peuvent développer une vitesse de (70 km à 200km). L'utilisation de la pile à combustible a permis d'augmenter considérablement l'autonomie

(400 à 450 km pour le moment) pour arriver à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques, donc l'apparition de nouvelles perspectives. La gamme de puissance s'étale d'environ 15 kW jusqu'à environ 100 kW. C'est l'utilisation des véhicules qui guident le choix de puissance, dont 20 à 30 kW sont suffisantes pour un véhicule urbain alors que 40 à 50 kW sont préférables pour une voiture routière. Pour ce qui est du prix de ces véhicules, il est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. On peut cependant estimer que si les technologies d'alimentation employées (batteries, pile à combustible) sont fabriquées à grande échelle, alors les prix seraient comparables à ceux des véhicules thermiques. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique [9].

I.5 - Fonctionnement d'un véhicule électrique

Les véhicules électriques sont dotés d'une batterie qui stocke l'énergie et se recharge grâce à l'électricité du réseau, d'un ou plusieurs moteurs électriques avec un système de contrôle et d'un chargeur de batterie.

La batterie est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur. Son fonctionnement est assez simple : lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) de la batterie en courant alternatif (AC) pour alimenter le moteur.

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique. En effet, un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces spécificités sont celles d'un moteur électrique [9].

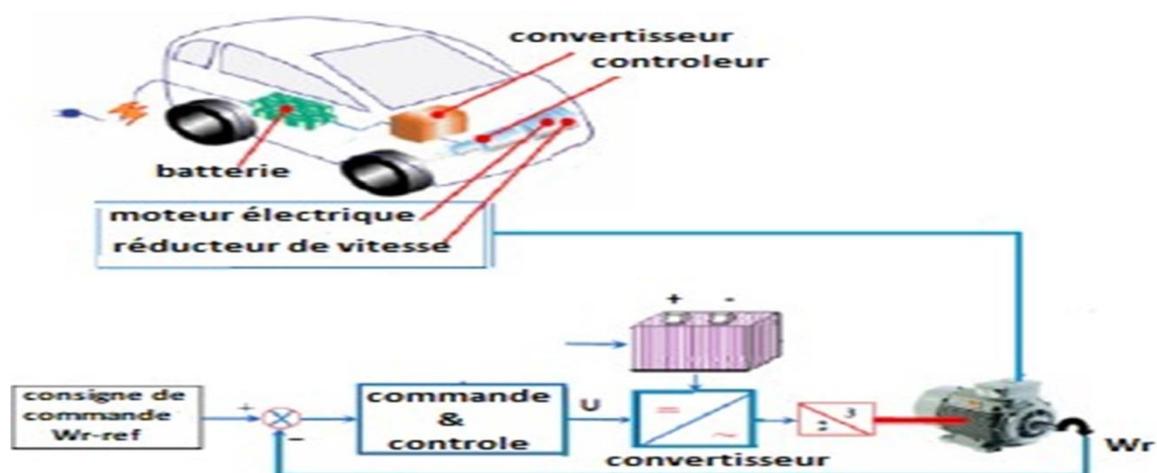


FIG I.8 – Composantes et fonctionnement d'un véhicule électrique

I.6 - Classification des véhicules électriques

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, Beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions des VE sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le stockage et l'utilisation de l'électricité [10]. Les VH font partie de la famille des véhicules électrifiés qui désigne l'ensemble des véhicules hybrides, hybrides rechargeables et électriques. A l'intérieur de ces familles, plusieurs sous catégories peuvent exister.

I.6.1 - Véhicules tout électrique (VTE)

Il s'agit d'un véhicule qui possède uniquement un accumulateur comme source d'énergie, ainsi, le VTE semble bien adapté pour les petits véhicules urbains. En effet, ceux-ci ne sont pas trop pénalisés par la limitation de la puissance et de l'autonomie car ils sont l'une des résolutions du problème de pollution gazeuse et sonore au niveau des conglomérations urbaines [8][10]. Le développement du VE est fortement lié au développement de son alimentation en énergie. Les batteries dont l'énergie massique est relativement faible sont de plus très lourdes et très coûteuses. Selon la source d'énergie utilisée pour alimenter ces véhicules, on distingue essentiellement deux types de véhicules électriques : voitures électriques à batteries rechargeables par prise de courant et voitures électriques à alimentation par pile à combustible.

I.6.2 - Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19^{ème} siècle, il est de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement.

I.6.3 - Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible

Les VE à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible. C'est un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards. Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à combustible produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant.

Il y a divers types de piles à combustible qui fonctionnent avec différents carburants mais la pile à membrane échangeuse de protons, considérée comme la plus prometteuse pour les véhicules automobiles, utilise de l'hydrogène H_2 et l'oxygène de l'air ambiant comme carburant.

L'application de cette technologie dans le domaine automobile est assez récente et relève encore de l'expérimentation. La pile à combustible existe depuis près deux cents ans. Elle fut inventée en Angleterre au début du 19ème siècle par deux anglais, Sir Henry Davy et Sir William Grove. Son principe de fonctionnement (Figure I.9) repose sur la production d'énergie par réaction entre de l'hydrogène et de l'oxygène. Cette réaction produit, en fait, de l'électricité, de l'eau et de la chaleur selon l'équation est la suivante [10].

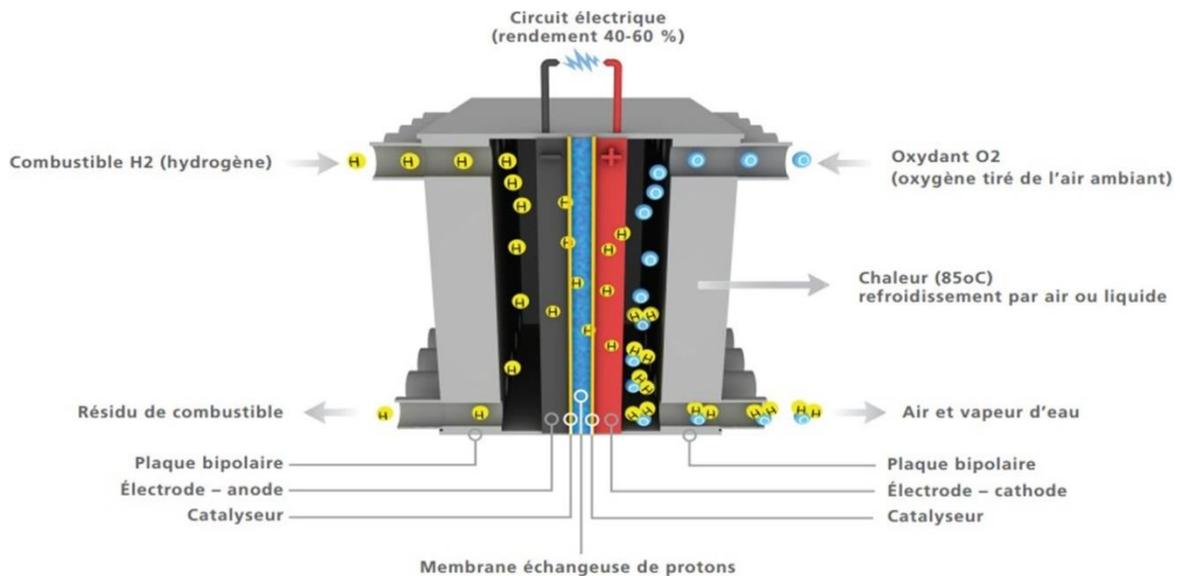
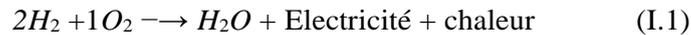


FIG I.9 – Principe de fonctionnement de la pile à combustible

Ballard Power Systems a annoncé d'être la première entreprise de pile à combustible à avoir permis à des bus (Figure I.10) en service de circuler sur plus de 10 millions km cumulés [11].



FIG I.10 – Auto bus à pile à combustible

La société a réussi cet exploit en sept générations de son moteur à pile à combustible FcveloCity, déployé au sein des autobus de 15 pays sur 5 continents au cours des 10 dernières années. Durant cette période, Ballard a travaillé avec 13 fabricants d'autobus pour développer

une variété de configurations de bus à pile à combustible, et ceci en étudiant un large éventail de conditions climatiques et de financement [12].

I.6.4 - Véhicules hybrides

Les véhicules hybrides utilisent au moins deux types de production et de stockage d'énergie habituellement un moteur thermique classique (essence ou diesel), en plus d'au moins un moteur électrique et le stockage d'électricité par batteries. Ces systèmes peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment les uns des autres. Les VH, sont quant à eux munis d'un moteur classique et d'un moteur électrique qui fonctionnent en combinaison selon la vitesse et l'accélération du véhicule. Le moteur électrique permet d'améliorer les performances du moteur thermique ainsi que l'autonomie du véhicule. On distingue deux principaux types de système d'entraînement hybrides : parallèle et série, ces systèmes diffèrent dans leur façon d'intégrer le fonctionnement des deux unités de production d'énergie.

I.6.5 - Véhicules hybrides série

Dans ce cas, le principe repose sur le fait que l'énergie électrique utilisée par le moteur électrique peut être produite par un alternateur entraîné par un moteur thermique fonctionnant à vitesse de rotation constante. Les deux moteurs sont donc en série, d'où l'appellation. On peut alors choisir la vitesse de rotation du moteur thermique de manière à obtenir un rendement maximum et par conséquent augmenter la quantité de carburant brûlée dans un cycle moteur, ce qui implique une diminution des rejets gazeux. Par ailleurs, la signature acoustique du moteur thermique peut être améliorée pour la vitesse de rotation fixe choisie [8]. Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure (I.11) :

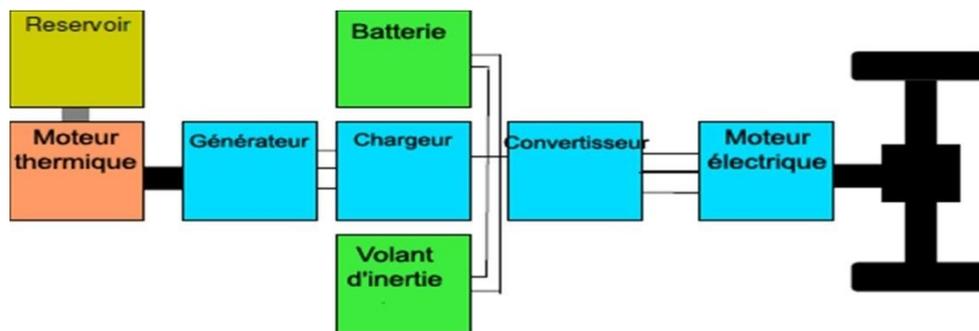


FIG I.11 – Véhicule hybride série

La plus grande partie de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du moteur électrique est fournie par la génératrice. La batterie est là uniquement en tampon pour fournir des pointes d'énergie ou pour fonctionner en mode tout électrique [9].

Un des inconvénients majeur de ce type d'architecture est le faible rendement global de l'ensemble car la puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est tout d'abord convertie en puissance électrique par l'alternateur, éventuellement stockée dans les batteries, puis reconverte en puissance mécanique par le moteur électrique. Cependant, du point de vue de la commande, cette architecture offre deux degrés de liberté : le régime et le couple du moteur thermique peuvent être choisis quasiment indépendamment des conditions de conduite [13].

I.6.6 - Véhicule hybride parallèle

La première idée est de faire deux véhicules en un, en bénéficiant des avantages de chacun. Le VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et un thermique. Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique [10]. Le schéma de principe d'un tel véhicule est donné sur la figure (I.12) :

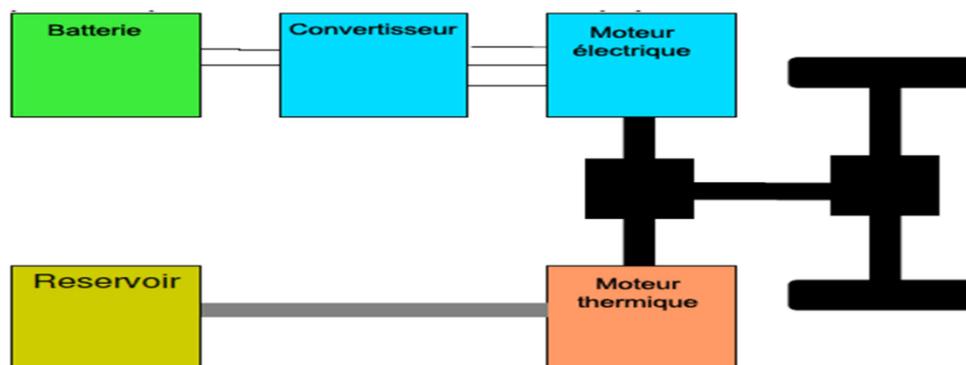


FIG I.12 – Véhicule hybride parallèle

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.6.7 - Véhicule hybride combiné

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, appelée aussi hybride parallèle à dérivation de puissance, cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, et fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique, et de partager son couple entre les demandes du véhicule, et la recharge de la batterie. Schématiser le fonctionnement d'un hybride combiné [11].

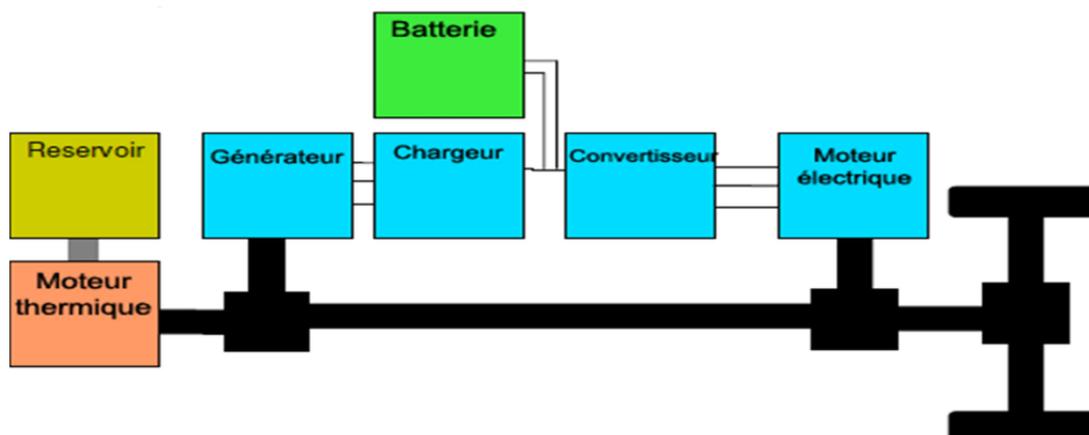


FIG I.13 – Véhicule hybride combiné

I.7- Les différentes configurations des véhicules électriques

Notre objectif, est d'établir une liste non exhaustive de quelques ébauches de solutions aux problèmes de la motorisation d'un véhicule électrique. Cette dernière, est proposée sous une forme soit monomoteur, soit multi-moteurs [6].

I.7.1 - Véhicules électriques mono moteur

L'architecture mono moteur (Figure I.14) 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) [7].

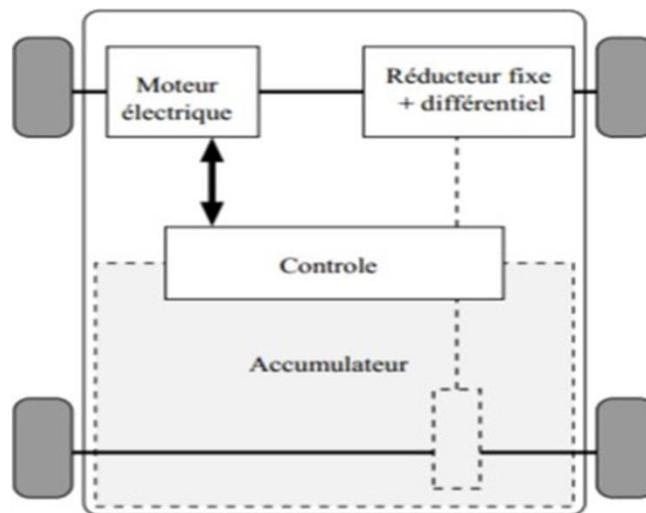


FIG I.14 – Solution monomoteurs

I.7.2 - Véhicules électriques multi-moteur

Sur 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 coté moteur (Figure I.15), l'autre utilise un moteur asynchrone et deux moteurs roue pour permettre d'augmenter le différentiel mécanique du véhicule [11].

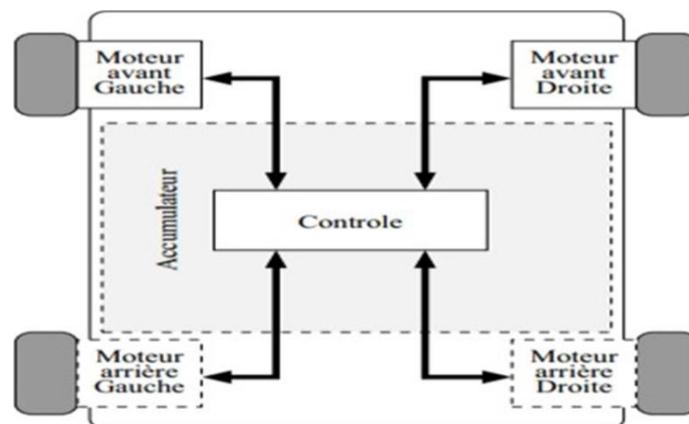


FIG I.15 – Solution multi-moteurs

Le moteur roue électrique (Figure I.16) est très proche d'un moteur "normal" ; la seule différence repose sur son agencement. Au lieu d'avoir un seul moteur placé sous le capot, deux (voir quatre) moteurs de plus petites tailles sont insérés directement dans les roues du véhicule. On notera que les batteries restent placées à l'intérieur de la voiture [12].

Ce système permet d'une part de contrôler avec haute précision et indépendamment le couple appliqué à chaque roue et d'autre part de maximiser la capacité du freinage régénérateur. L'utilisation de ce type de moteur sur des roues directrices permet la suppression de toutes les parties mécaniques liées de la transmission, de commander indépendamment les roues et en même temps, de libérer de l'espace dans le véhicule [13]. Cette grande liberté permet un contrôle indépendant du couple ce qui peut améliorer la sécurité de transport.

Les inconvénients de ce type de moteur sont l'augmentation de la masse non-suspendue et la difficulté d'intégrer un réducteur. Ainsi, l'introduction d'un moteur à fort couple dans la roue peut avoir tendance à déstabiliser le véhicule.



FIG I.16 – Moteur-roue

I.8 - 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 traction sont décrits dans la figure(I.17):

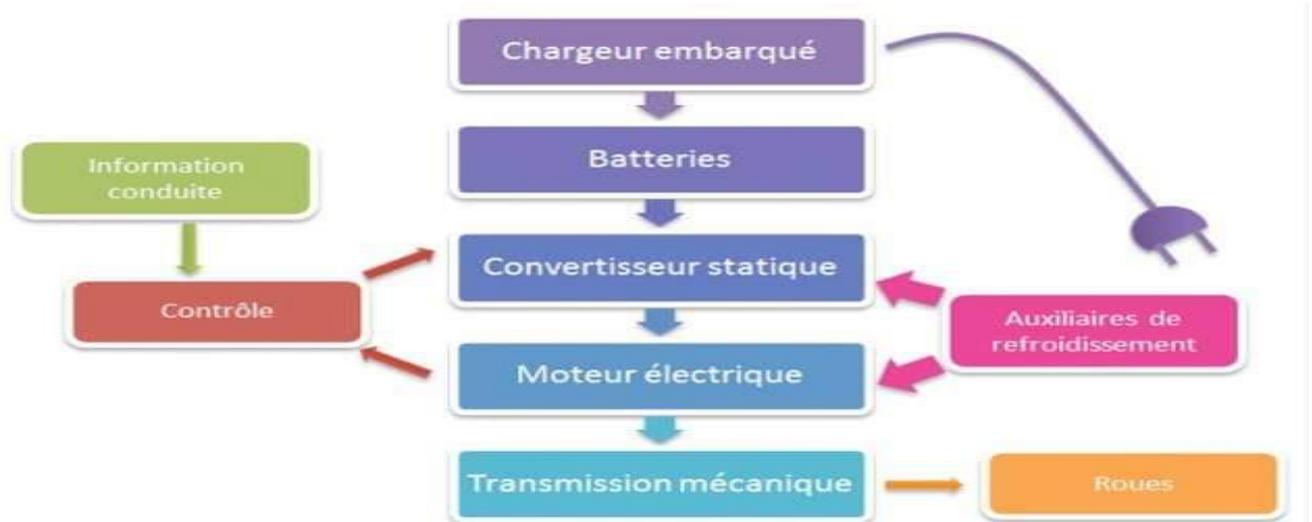


FIG I.17 – la chaîne de traction dans un VE

Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur.

Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche.

Dans cette partie, on essayera de présenter les organes de la traction électrique en justifiant le choix de chaque organe [13].

I.9 - L'électronique de puissance dans le véhicule électrique

I.9.1 - Les redresseurs (AC/DC)

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisées pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseaux de distribution générale, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique, en énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques ou dans une batterie de grande capacité .

I.9.2 - Les onduleurs (DC-AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur a courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et les moteurs de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage [14].

I.9.3 - Les hacheurs (DC-DC)

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation des divers récepteurs (capteurs, régulateurs, etc.). Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels :

- Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.

- Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc.).

I.9.4 - Le chargeur

Les chargeurs de batteries sont spécifiques au type d'alimentation électrique à leur emplacement (embarqués ou non au sein du véhicule) et au mode de transmission de l'énergie. Pendant la charge,

la batterie se comporte comme un récepteur de courant [13] [14]. Deux grands types des chargeurs ont été définis pour cette fonction :

a - Les chargeurs de type " lents " : Le chargeur de type lent est un dispositif d'une puissance moyenne, généralement de 3 kW. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures. Cette opération peut donc s'effectuer en heures creuses.

b - Les chargeurs de type " rapides " : Les structures, dont la puissance transmise est supérieure à 10 kW, ont été classées dans les chargeurs dits rapides. La puissance maximale atteint aujourd'hui 150 kW. L'objectif de ce type de montage est de permettre, en peu de temps (inférieur à 30 min.) une recharge partielle (80 %) des batteries [14]. Le tableau (I.1) donne une estimation du temps de recharge selon les sources d'alimentation.

Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant maximum	Type de charge
6 à 8 heures	Monophasée 3.3 kw	230 VAC	16 A	L e n t e
2 à 3 heures	Triphasée 10 kw	400 VAC	16 A	
3 à 4 heures	Monophasée 7 kw	230 VAC	32 A	
1 à 2 heures	Triphasée 22 kw	400 VAC	32 A	Rapide
20 à 30 minutes	Triphasée 43 kw	400 VAC	63 A	
20 à 30 minutes	Continue 50 kw	400 à 500 VAC	100 à 125 A	

TABLE I.1 – Temps de charge des batteries [3]

I.10 - Diverses sources d'énergie électrique

I.10.1 - La batterie

La batterie est le point de stockage de l'électricité. Elle est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. La batterie est chargée, à partir d'une source extérieure pendant les périodes de repos, le major problème de cette dernière c'est la durée de vie qui n'est pas très grande, et le temps important qu'elle prenne pour se charger. Elles peuvent être en plomb, en Ni-Cd, en Ni-Mh ou en lithium (Figure I.18) :



FIG I.18 – Différentes types des batteries

a - Les batteries au plomb : représentent la technologie la plus ancienne, elles furent utilisées dans les premiers temps des VE, aujourd'hui sont largement délaissées. La raison en est leurs caractéristiques énergétiques et de puissance plus faibles par unité de masse que les autres solutions disponibles.

b - Les batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd) : largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. et la toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré et que leur application risque d'être limitée [15].

c - Les batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH) : sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH, et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières. Pour autant leurs performances restent encore trop faibles pour être le seul conteneur d'énergie d'une voiture [16].

d - les batteries au lithium : ce sont celles qui présentent le meilleur rapport masse-puissance et masse-énergie. Par ailleurs elles ne souffrent pas de « l'effet mémoire » (une perte de capacité lorsqu'elles sont rechargées avant d'être complètement déchargées). La plus utilisée est la batterie Lithium-ion, les chercheurs pensent que se composant prolongerait de façon conséquente l'autonomie du véhicule.

En effet, il serait possible que le véhicule puisse parcourir plus de 200 km avec cette batterie de nouvelle génération. En outre, la batterie au lithium favoriserait un abaissement des coûts de consommation et gagnerait facilement de la sorte la faveur des acheteurs.

Le tableau (I.2) donne une comparaison des différentes technologies des batteries :

Batterie	Plomb acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200
Nombre de cycles (charge/décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200
Temps de charge	6 à 12h	1 à 2h	2 à 4h	2 à 4h
Température de fonctionnement	-20 à 60C	-40 à 60C	-20 à 60C	-20 à 60C

TABLE I.2 – Tableau comparatif des technologies des batteries

I.10.2 - Les super condensateurs

Les super condensateurs (Figure I.19) stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (batteries ou pile à combustible) [17].



FIG I.19 – Exemple de super condensateur

Le super condensateur se compose de deux collecteurs métalliques (Figure I.20), chacun couplés à deux électrodes carbonées, poreuses et imprégnées d'électrolyte.

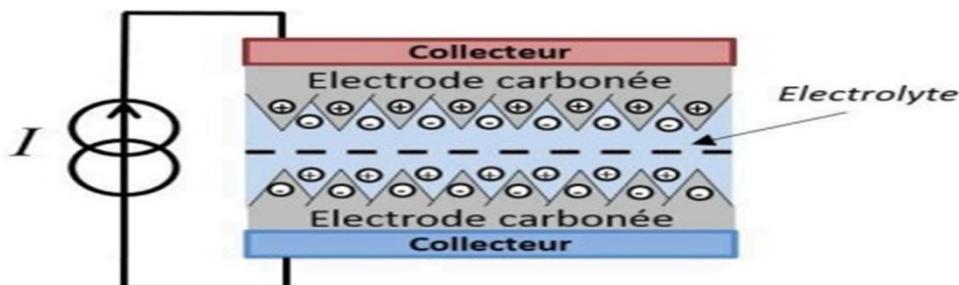


FIG I.20 – Composition d'un super condensateu

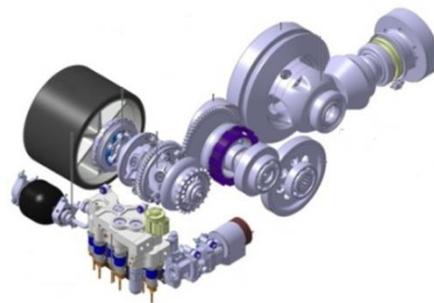
Pour remédier aux problèmes de surdimensionnement des batteries dans les applications VEH, les super condensateurs présentent des propriétés très intéressantes. La cinétique du transfert de charge est plus rapide que dans le cas des batteries. Leur durée de vie est de l'ordre de quelques centaines de milliers de cycles de charge/décharge [18].

I.10.3 - Les volants d'inertie

Les volants d'inertie stockent l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique. Ils sont soit totalement mécanique avec un système d'embrayage et un multiplicateur de vitesse (Figure I.21b) soit le système est composé d'un volant entraîné par une machine électrique (Figure I.21a). Les points positifs sont la durée de vie des éléments sous vide et la puissance massique. La sécurité est le problème majeur de cette technologie car le rotor tourne à très haute vitesse (jusqu'à 80 000tr/min) [19].



(a) Volant d'inertie du tramway



(b) Volant d'inertie mécanique

FIG I.21 – Les volants d'inertie

Le couplage de ce volant avec un moto-générateur permet de transformer l'énergie cinétique sous forme électrique. Pour augmenter la densité d'énergie et pour minimiser le volume du système, on préfère augmenter la vitesse plutôt que le moment d'inertie.

Les volants d'inertie modernes à très haute vitesse utilisent un volant en matériaux composites capables de résister à la force centrifuge et surtout à de très grandes vitesses périphériques, la limite étant à environ 800m/s [20].

Actuellement, l'utilisation d'un volant d'inertie n'est pas envisagée pour les véhicules légers et elle est limitée aux véhicules lourds car ils restent une procédure complexe qui conduit à un coût élevé .

I.10.4 - Les moteurs électriques utilisés pour les voitures électriques

C'est un composant très simple au cœur de la voiture électrique, 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 [21].

a - Le moteur à courant continu (MCC)

La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, la choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en générale, les 0,3 à 0,5 kW/kg, alors que celle des moteurs à essence est de l'ordre 0,75 à 1,1 kW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application [22].

b - Le moteur asynchrone (MAS)

Le moteur asynchrone est formé d'un stator et d'un rotor :

- **Stator** : la partie fixe du moteur. Il comporte trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile (Y) ou en triangle (Δ) selon le réseau d'alimentation.
- **Rotor** : la partie tournante du moteur. Cylindrique, il porte soit un bobinage (d'ordinaire triphasé comme le stator) accessible par trois bagues et trois balais, soit une cage d'écureuil non accessible, à base de barres conductrices en aluminium. Dans les deux cas, le circuit rotorique est mis en court-circuit (par des anneaux ou un rhéostat [23]).

La machine asynchrone, du part sa simplicité de fabrication et d'entretien est actuellement la machine la plus répandue dans le secteur industriel et présente de bien meilleures performances que les autres types de machines. Par ailleurs, ces machines possèdent un couple massique, un rendement et un facteur de puissance plus faible que les machines à aimants.

c - Le moteur synchrone

Bien que plus délicats à piloter, plus coûteux et potentiellement moins robuste, le choix du moteur synchrone s'est imposé dans les véhicules électriques et hybrides. La machine synchrone offre le meilleur rendement en mode générateur et moteur. Le moteur synchrone se compose, Comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor [23].

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons deux types les plus fréquents dans la littérature :

d - Le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP)

C'est le moteur la plus populaire pour l'entraînement des véhicules électriques car, il offre des meilleures performances en termes de rendement, de couple et de puissance massique. De plus, il Demande peu de maintenance et il est relativement facile à commander. Cependant le coût de production, dépendant essentiellement de la qualité des aimants, est parmi les plus élevés .

e - Le moteur synchrone à reluctance variable (MRV)

Le rotor de ce type de moteur ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation. Le couple est créé seulement grâce à l'effet reluctance. Le stator est semblable à celui de la majorité des machines à courant alternatif

Le rotor est construit de manière à ce que le rapport entre l'inductance dans l'axe direct et l'axe en quadrature (L_d/L_q) soit le plus important possible. La plage de fonctionnement en vitesse à puissance constante est directement liée à ce rapport. Il en est de même pour le facteur de puissance (plus ce rapport est élevé plus le facteur de puissance est grand). L'obtention d'un rapport (L_d/L_q) élevé induit des contraintes au niveau de la fabrication, qui se répercutent négativement sur le 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.

Une comparaison quantitative des quatre machines en fonction des critères spécifiques à la traction électrique, est résumée dans le tableau I.3. 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].

Critère \ Machine	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 alimentation	4	5	3	2
Total	18.5	28.5	27.5	29

TABLE I.3 – Comparaison des quatre machines de traction électrique [24, 25]

Dans cette étude, nous optons pour le moteur MRV car c'est le plus favorisée en termes de critères technologiques (tel que le meilleur rendement en mode générateur et moteur), en plus il a un couple massique plus élevé. Le véhicule électrique choisi dans tous ce qui suit est propulsé par deux roues motrices avant. Les deux roues seront entraînées par moteur MRV 8/6 pôles à travers une transmission différentielle fixe.

I.11 - Avantages et inconvénient des véhicules électriques

I.11.1 - Avantages

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui la prédominent sur les véhicules a combustion interne et qu'on peut les énumérer comme suit :

- 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 composés 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 principale mode d'habitat du futur (mégapole).
- Le moteur électrique a un rendement énergétique 3 fois 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).
- L'indépendance vis-à-vis du pétrole.

I.11.2 - Inconvénients

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

- Question autonomie.
- Sans oublier que 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 les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.
- Ainsi 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'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.

La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes.

I.12 - Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés un état de l'art sur les véhicules électriques (VE) et leurs évolutions à travers l'histoire. Ensuite nous avons cité leurs différents types ainsi que leur classification selon leurs sources d'énergie. Nous avons présenté aussi l'architecture des chaînes de tractions des VE tout en se basant sur les différentes technologies utilisées. Dans ce premier chapitre, on a justifié aussi notre choix du MRV comme solution pour la traction du VE en se basant sur les critères du rendement, vitesse, coût et le rapport couple-vitesse.

Chapiter II

Généralités sur les MRV

II.1 - 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 déexciter 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).

Malgré que cette machine soit simple, elle a besoin d'un convertisseur à semi-conducteurs pour assurer les séquences de commutation des phases ainsi qu'un capteur de position du rotor avec une précision suffisante pour assurer la commutation des courants dans les enroulements du stator (d'où l'appellation anglo-saxonne de Switched Reluctance Machine). Pour ces raisons et d'autres, cette machine n'a pu se développer que tardivement, en 1980, avec l'apparition de nouveaux semi-conducteurs de puissance, de nouvelles techniques de commande, des modèles et logiciels de conception et simulation [26].

La machine à reluctance variable possède plusieurs avantages qui seront énumérés à la fin de ce chapitre. D'après les constructeurs des machines électriques, la MRV a un rapport constitué de pôles saillants qui facilitent le logement des enroulements d'alimentation et d'un rotor passif, sans bobinage ni aimant permanent. Elle possède aussi un fort couple massique, une grande robustesse du rotor qui la destine aussi bien aux applications forte-puissances grandes-vitesses (traction) que forts-couples basses-vitesses (aérogénérateurs à attaque directe). Des paramètres tel que rendement, couple de démarrage et couple de surcharge de la MRV sont meilleurs en comparaison avec la machine à induction.

Les inconvénients de la machine à reluctance variable sont l'ondulation du couple, un bruit acoustique important et des contraintes mécaniques de construction d'un entrefer très petit. Les chercheurs et constructeurs ont pu remédier à certains de ces inconvénients [27].

II.2 - Classification des MRV

Dans la communauté des électrotechniciens, ils ont convenu de classer les machines électriques selon le type d'énergie électrique (continue ou alternative). Mais cela n'empêche pas que d'autres classifications prennent en considération la géométrie, le type de mouvement (linéaire, rotatif ou combiné)...etc. En menant les recherches bibliographiques, il a été constaté que les MRV ne se soumettent pas à une classification évidente. En effet, pour la même géométrie, ils peuvent fonctionner avec de l'énergie électrique continue comme le Moteur à Reluctance Variable pure à double denture, ou avec de l'énergie alternative tel que le MRV synchrone, VERNIER, hybride, ...etc. Certains auteurs [28] ont essayé de lui trouver une place dans « l'arbre généalogique » des machines électriques. Dépourvu de collecteur, la MRV se place du côté des machines à courant alternatif comme le montre la figure ci-dessous.

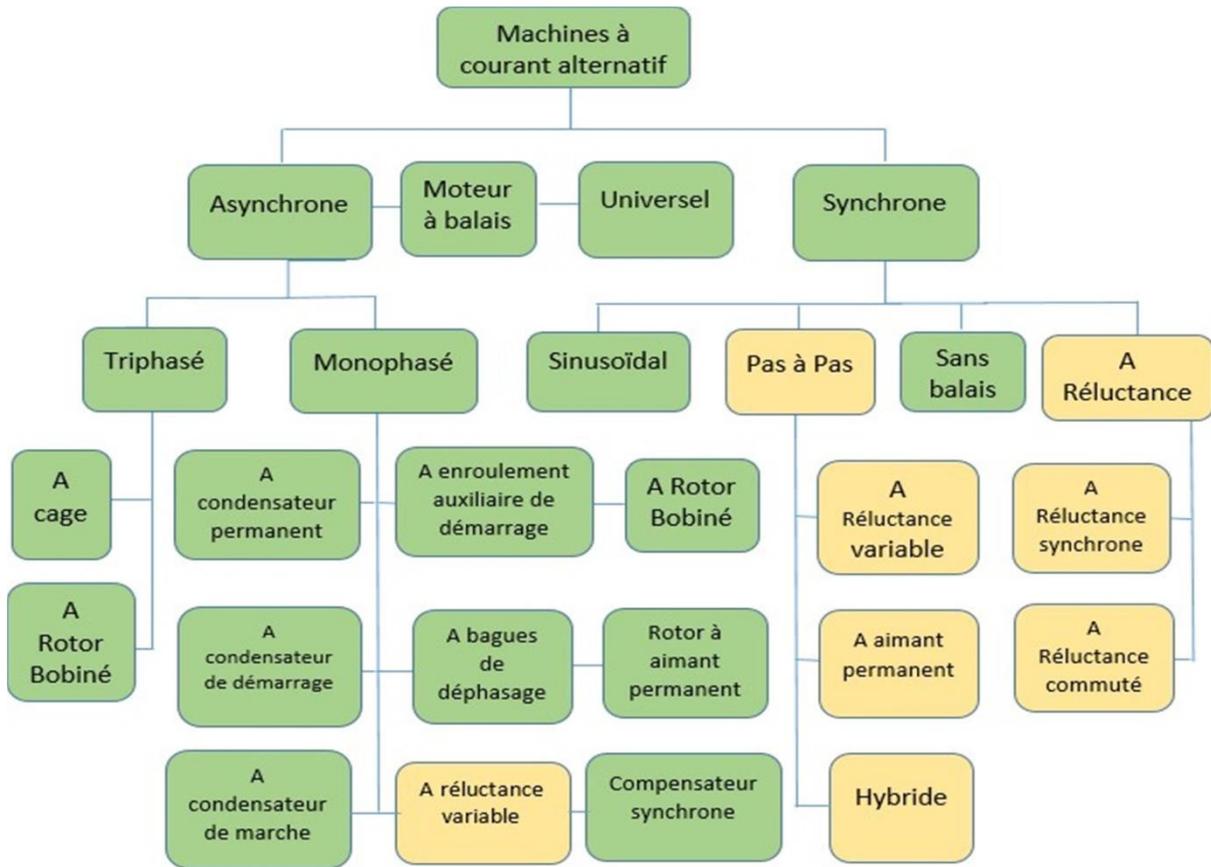


FIG II.1 – arbre généalogique des MRV [29]

II.3 - Topologies des MRV tournantes

Notre machine sera composée d'un stator classique de huit pôles et d'un rotor en matériaux ferromagnétiques de six pôles. Le couple est proportionnel à la différence des inductances d'axe d et d'axe q ($L_{max} - L_{min}$). Cette différence est liée aux perméabilités magnétiques suivant les axes transverses et longitudinaux. Dans une MRV classique, cette différence est réalisée par le biais d'alternances entre des matériaux ferromagnétiques et amagnétiques (air).

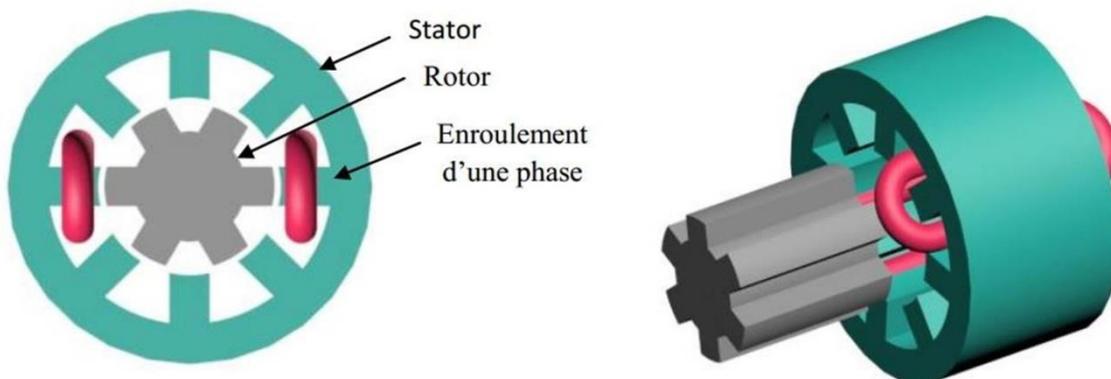


FIG II.2 – Constitution d'une machine à reluctance variable type MRV 8/6 [27]

Les MRV peuvent être à mouvement rotatif ou linéaire, mais nous nous focalisons sur les

machines tournantes. 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 [29] :

- 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 :

II.3.1 - 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 [31]:

- Structures à double denture à grosses dents à 2 dents par phase (figure II.3).
- 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 ».



FIG II.3 – MRV pur à grosses dents

II.3.2 - Les MRV à effet Vernier

Les MRV à effet Vernier possèdent des structures identiques aux MRV pures 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 II.4); sur chaque armature, les dents sont identiques et équiréparties 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.



FIG II.4 – MRV à effet Vernier à stator externe et interne [30]

II.3.3 - Les MRV hybrides

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 II.5), 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 au stator dite « MRV polarisée » [29]

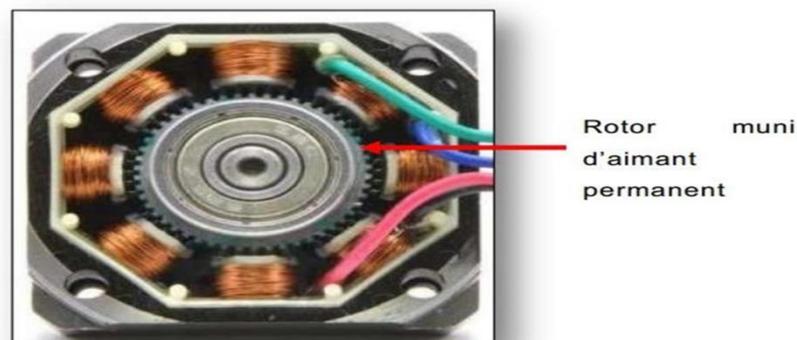


FIG II.5 – MRV hybride [29]

II.4 - Choix de la structure

Le choix d'une machine dépend essentiellement de l'application et le cahier de charge, si on prend le problème des véhicules électrique (V.E.) on trouve que la conception de la motorisation d'un V.E. doit tenir compte de nombreuses contraintes techniques, économiques et opérationnelles du marché de l'automobile telles que : rendement élevé, couple élevé à vitesse quasi-nulle, possibilité de récupération d'énergie au freinage, puissance spécifique élevée, réduction du nombre de semi-conducteurs de puissance,.....[32] [33] [34]

Nous avons choisi pour ce travail la structure d'une MRV pure pour la simplicité de sa construction, et les simulations sont faites en mode moteur.

II.5 - Principe de fonctionnement

Quel que soit le type de machine à réluctance 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 la structure monophasée élémentaire représentée (Fig.II.6). 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. Le flux magnétique créé par les ampères tours (Ni) oscille entre 2 valeurs extrêmes correspondant aux 2 positions [35]:

- Une position d'opposition (Fig.II.6 .a) dans laquelle le circuit magnétique présente uneréluctance maximale, ou une inductance minimale ;
- Une position de conjonction (Fig. II.6.b) dans laquelle le circuit magnétique présenteune réluctance minimale, ou une inductance maximale.

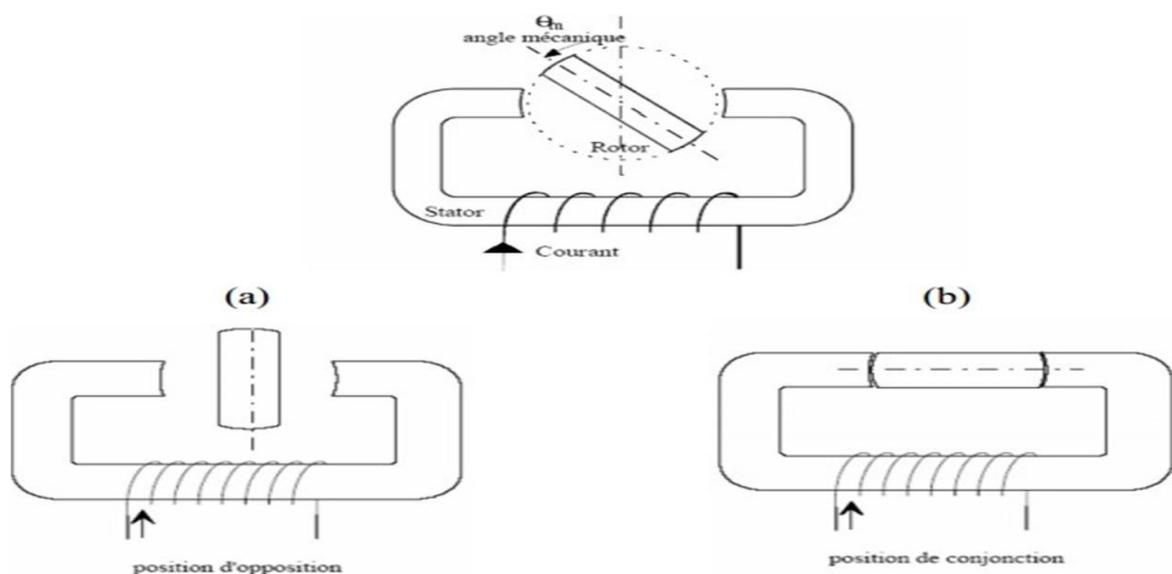


FIG II.6 – Structure MRV de base et positions extrêmes du rotor [35]

A partir de la position d'opposition ($\theta_m = 0$), pour que la pièce ferromagnétique rotorique se mette à tourner, nous devrions alimenter l'électroaimant fixe jusqu'à la position de conjonction ($\theta_m = \pi / 2$), selon la règle du « flux max. ou de la réluctance min. », et ainsi de suite ...

L'alimentation de la machine avec un courant constant lors de la phase croissante ou décroissante d'inductance (Fig.II.7a) donnera le régime de fonctionnement souhaité :

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

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

Typiquement, il y a un nombre inégal de pôles saillants au stator et au rotor. Il existe pour cela des règles régissant le nombre de dents statoriques N_s et rotoriques N_r ainsi que le nombre de phases k pour assurer un bon fonctionnement de la MRV (figure II.7 (b)).

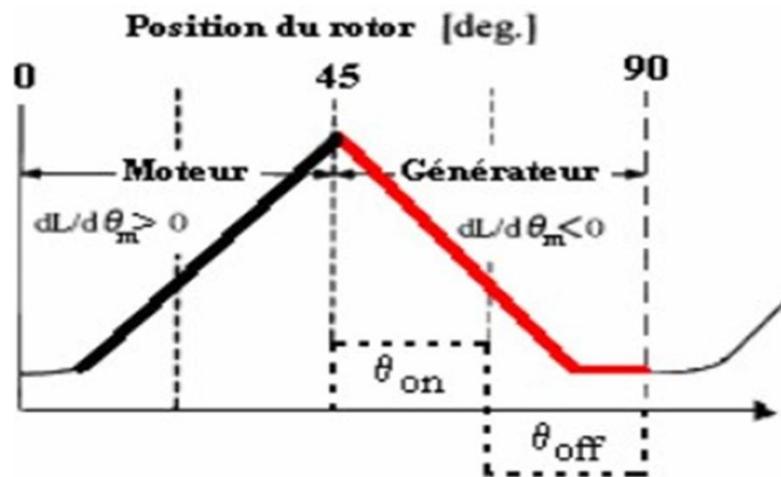


FIG II.7 (a) – Variation de l'inductance en fonction de la position du rotor [36]

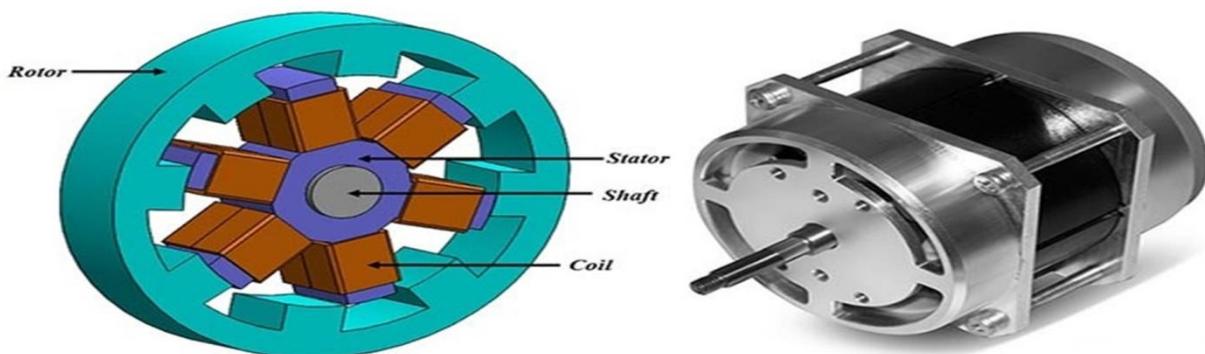


FIG II.7 (b) – Structure électromagnétique d'une MRV 8/6

Si le rotor se trouve dans une position intermédiaire entre l'opposition et la conjonction,

l'injection d'un courant dans l'enroulement d'excitation modifie l'état du système qui tend alors à présenter une réluctance minimale (flux maximal) ; on observe ainsi une rotation du rotor vers la position de conjonction. Lorsque le courant est supprimé, si l'énergie cinétique emmagasinée durant la rotation est suffisante pour l'amener jusqu'à l'opposition, alors on peut répéter le cycle et obtenir un mouvement continu de rotation (Fig. II.8).

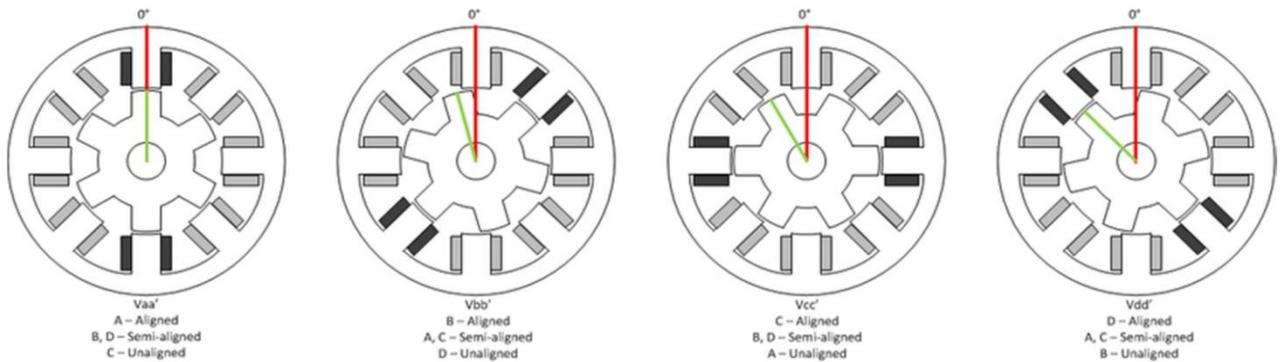


FIG II.8 – Positions d'opposition et de conjonction d'une MRV 8/6

La période de variation de la réluctance vue d'une phase correspond au passage de la conjonction d'une dent à la conjonction de la dent suivante. La relation entre les angles électrique θ_e et mécanique θ_m est donnée par : $\theta_e = Nr.\theta_m$. [36]

II.5.1 - Fonctionnement en moteur

Le moteur à réluctance variable est un moteur électrique à double saillance ; le stator et le rotor sont à pôles saillants. Son principe de fonctionnement se base sur le phénomène de l'attraction du fer par les électro-aimants. En effet, lorsque deux pôles opposés du stator sont excités, deux pôles du rotor s'alignent avec eux, mais un autre ensemble de pôles est hors alignement. L'alimentation d'une autre paire de pôles du stator amène encore une fois les pôles du rotor à l'alignement. De la même façon, et en commutant séquentiellement le courant dans les enroulements du stator, le rotor tourne. La figure II.9 montre un exemple d'un MRV de type 8/6 pôles.

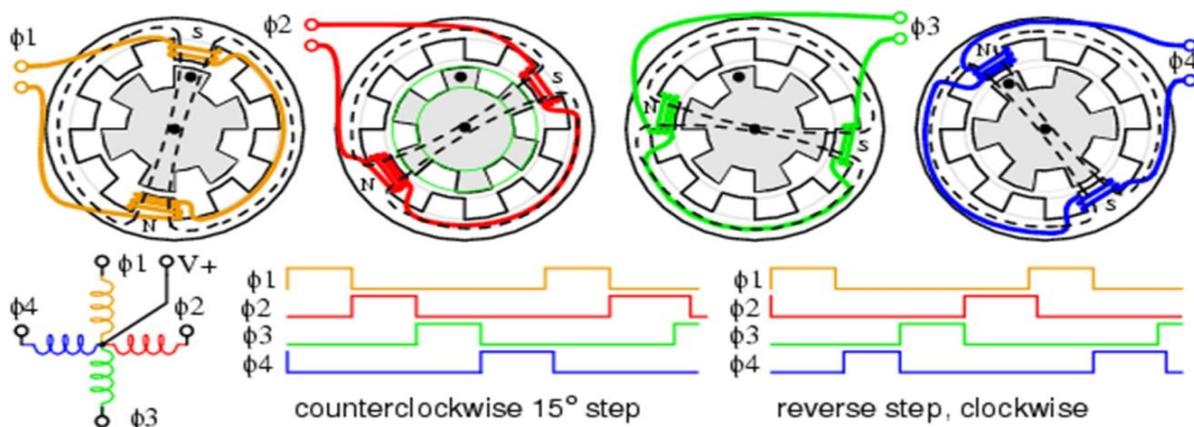


FIG II.9 – Fonctionnement MRV 8/6 pôle

Dans La figure II.9, en passant de 1 à 2, etc., le champ magnétique du stator tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. L'angle des dents du rotor de 45° entre dans le calcul par l'équation ci-dessus. Le rotor s'est déplacé dans le sens antihoraire vers la dent de rotor suivante à 45° , mais il s'aligne avec une dent statorique de 30° dans le sens horaire. Ainsi, l'angle de pas réel est la différence entre un angle de stator de 45° et un angle de rotor de 30° . Jusqu'où tournerait le moteur pas à pas si le rotor et le stator avaient le même nombre de dents? Zéro - pas de notation.

En commençant au repos avec la phase 1 sous tension, trois impulsions sont nécessaires (ϕ_2 , ϕ_3 , ϕ_4) pour aligner la dent du rotor « en pointillé » sur la prochaine dent du stator, qui est à 45° . Avec 3 impulsions par dent de stator et 8 dents de stator, 24 impulsions ou pas déplacent le rotor sur 360° [37].

II.5.2 - 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 autre 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 II.10 montre la caractéristique couple vitesse d'un MRV.

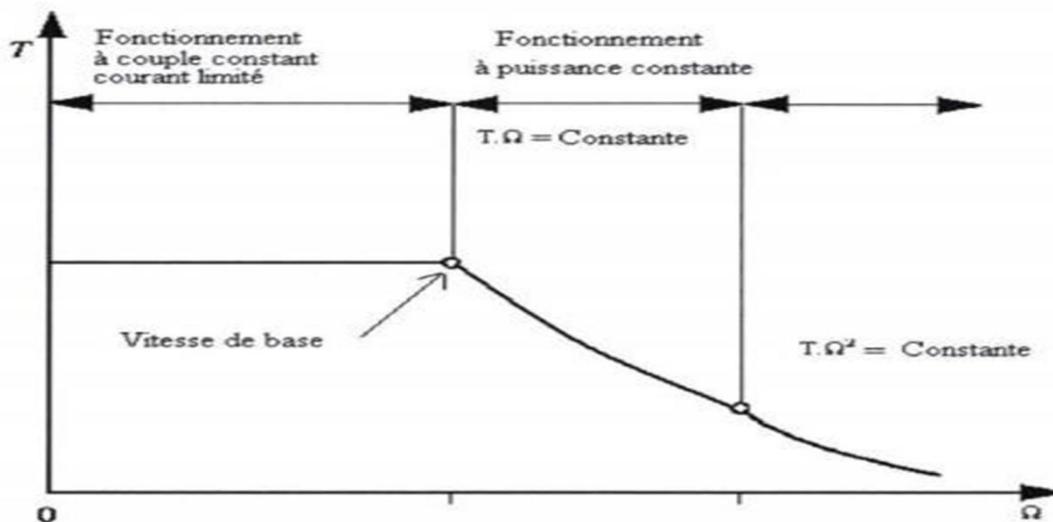


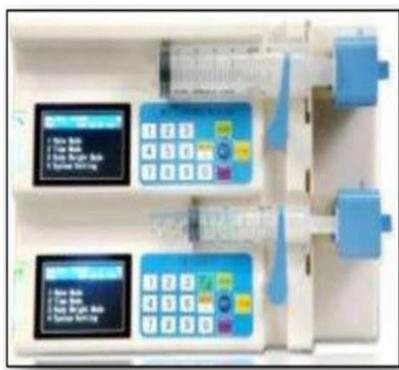
FIG II.10 – Caractéristique couple vitesse d'un moteur à reluctance variable

Le moteur fonctionne à couple constant jusqu'à la vitesse de base. 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 [38].

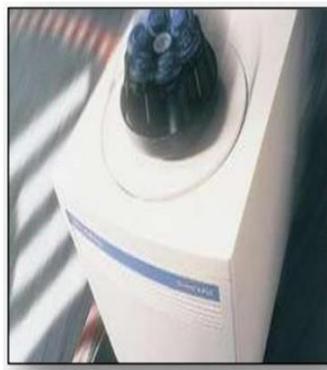
II.6 - Les applications du MRV

D'une façon générale, le MRV présente beaucoup d'avantages et peut être employé avec succès en tant que moteur à vitesse variable. Il fournit des solutions pour des applications très

variées, notamment des applications de traction de petite taille, avec des performances très satisfaisantes et des puissances pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilowatts. Le MRV présente une alternative dans une multitude d'applications. Parmi ces applications nous pouvons citer: - Les applications spécifiques : compresseurs, ventilateurs, pompes. Les équipements médicaux et de laboratoires comme les pousse-seringues [39] (figure II.11.a), les centrifugeuses (figure II.11.b), ainsi que les fauteuils roulants électriques (figure II.11.c)...



(a) Pousse-seringue



(b) Centrifugeuse



(c) Fauteuil roulant électrique

Fig.II.11 – applications du MRV

Les appareils ménagers : Robot ménager (figure A), lave-linge (figure B), lave-vaisselle, horlogerie, jouets...



(A) Robot ménager



(B) Lave-linge

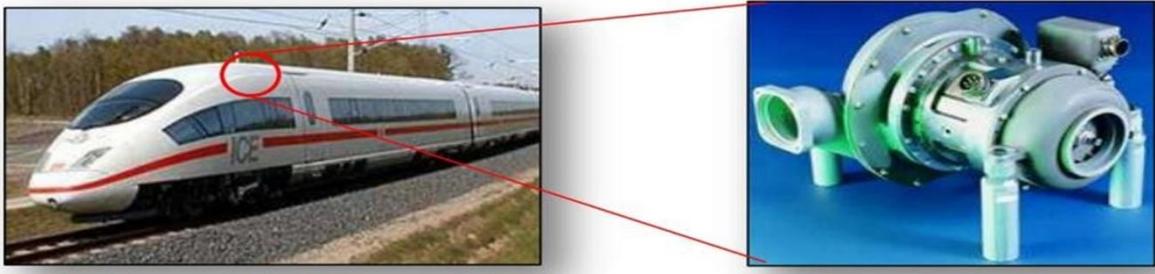
FIG II.12 – Des applications spécifiques : compresseurs, ventilateurs, pompes. Les équipements médicaux

Les applications pour les véhicules électriques [40] et hybrides [41] (figure A1), le

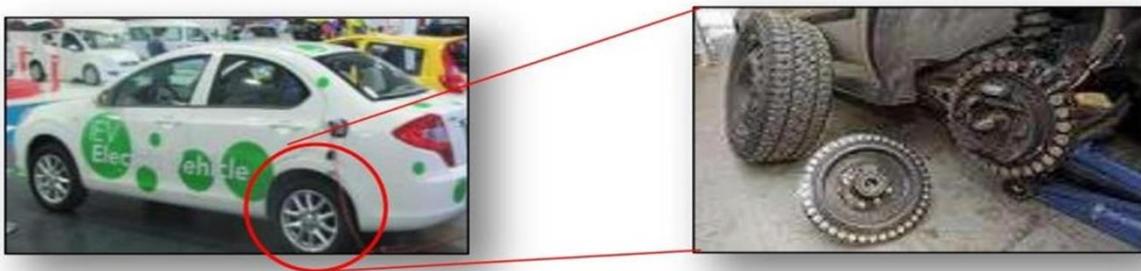
Domaine de traction électrique sur rails comme les MRV linéaires [18] ainsi que les rotors « in Wheel » directement associés aux roues [42] (figure C1) et les équipements de bord (figure B1).



(A1) Véhicule électrique Hybride



(B1) Equipement de bord des trains



(C1) Rotor « in Wheel »

FIG II.13 – Des applications pour les véhicules électriques

- Les automatismes industriels : ascenseurs [43], servomécanismes, portes automatiques (figure II.14), actionneurs, positionnement...

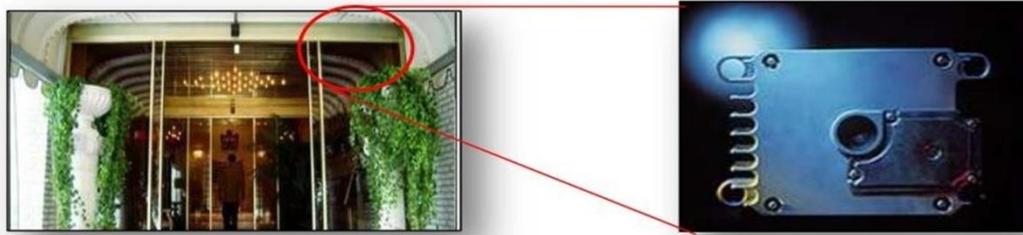


FIG II.14 – Porte automatique utilisant de MRV

- Les équipements informatiques et bureautiques : impression, ventilateur, têtes de lecteur...
- Les pompes à fuel et appareillages embarqués à bord des avions [44], navettes spatiales, fusées et différents équipements aéronautiques et aérospatiaux ; Le manque d'une atmosphère dans l'espace fait que le moteur électronique est le seul choix viable pour les systèmes de propulsion des robots d'exploration spatiale [45]. L'agence NASA pour son programme d'exploration de mars a conçu un MRV pouvant supporter une température de 540° pendant 27 heures [46].

II.7 – Avantages et problématiques de la MRV

II.7.1 Avantages

Les caractéristiques de la machine à reluctance variable ont été largement discutées dans la littérature et, comme n'importe quel type de machine électrique, la MRV possède des avantages que nous allons exposer dans ce qui va suivre [47] :

- Construction simple et robuste : d'un point de vue mécanique, la MRV est très simple. Le rotor ne comporte ni aimant permanent ni conducteurs. Le bobinage du stator est également très simple car les bobines sont insérées dans les pôles de stator. En raison de la simplicité de construction, le coût de fabrication peut également être fortement réduit.
- Pas de bobinage ni aimant sur le rotor : l'absence de bobinage au niveau du rotor implique que les pertes par effet joule donc l'énergie thermique associée est inférieure à celle produite par les machines à courant continu ou les machines à induction(Asynchrone), ainsi que la difficulté d'évacuer la chaleur produite. L'absence de bobinage et d'aimants dans le rotor permet à la MRV de fonctionner à des vitesses très élevées.
- Faible inertie : dans les applications où la vitesse de référence varie beaucoup (marche- arrêt), il est très important d'avoir une faible inertie, de sorte que le

couple d'accélération peut être réduit. Le rotor de la MRV ayant généralement une faible inertie, ceci l'avantagerait par rapport à d'autres machines électriques.

- Absence d'encoches de logement des conducteurs : c'est l'un des très grands avantages des MRV car les pertes produites par les extrémités des enroulements sont réduites ; la longueur totale de l'empilement du circuit magnétique du stator sera plus faible.
- Moins d'encoches et de bobines : une MRV 8/6 a besoin de 8 bobines ce qui est équivalent à une machine asynchrone triphasée de 16 encoches, rarement utilisée car elle possède généralement plus de 16 encoches afin de minimiser les harmoniques ; donc moins de bobines rendra facile la fabrication.
- Tolérance de panne : en raison des faibles effets de couplage entre les phases du moteur, la MRV est tolérante aux pannes (fault tolérant). Une MRV triphasée peut produire un couple sur une seule phase, les deux autres phases étant inactives.
- Le MRV peut être classée comme une machine brushless du fait que son rotor n'est pas muni d'un système bagues-balais comme les moteurs à courant continu ou les machines synchrones et asynchrones bobinées, ce qui est un avantage.
- Haute efficacité : il est extrêmement difficile voire impossible de comparer l'efficacité des moteurs de différents types parce qu'il n'y a pas de règle d'or ou une norme pour cela. Le fait est qu'il y a tellement d'aspects comme la taille, la production, le coût, le contrôle, le type d'application, la durée de vie, qui doivent être pris en compte pour que la comparaison soit significative.

II.7.1 Problématiques

- L'inconvénient majeur du MRV est l'ondulation du couple due aux formes des courants de phases et des FEM de machine, et cette ondulation du couple est généralement nuisibles au bon fonctionnement du dispositif.
- 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.

II.8 - Conclusion

Dans ce chapitre le contexte du domaine de la traction électrique légère est présenté pour justifier l'intérêt des industriels pour le MRV qui justifie l'actualité du sujet abordé. Plusieurs types de moteurs électriques sont comparés sur la base des critères spécifiques à l'application et à la base de quoi, le choix pour le moteur à réductance variable comme solution de traction électrique légère est justifié et les notions générales sur sa structure et son fonctionnement sont présentées. Le principe de son fonctionnement est expliqué ainsi que ces avantages qui le rend prédominant et un moteur de premier choix pour la traction des véhicules électriques.

Chapter III

Commande du MRVCE

III.1 - Introduction

Dans le contexte de la traction électrique, l'efficacité énergétique de l'ensemble de la transmission est primordiale. En effet, la machine électrique doit offrir un rendement élevé et un couple avec de faibles ondulations en régime établi sur toute la plage de vitesses. La chaîne de traction du véhicule électrique (figure III.1) est composée d'une machine électrique reliée mécaniquement à la charge du véhicule par l'intermédiaire d'une transmission différentielle.

L'alimentation de la machine électrique est assurée par un convertisseur de puissance associé à une série de batteries [48]. La propulsion du véhicule est assurée par le conducteur via la pédale d'accélération et la pédale de frein mécanique. Les positions de ces deux pédales sont transmises à l'unité de contrôle afin de fournir les couples de références en mode moteur et en mode génératrice (freinage de récupération). En effet, les machines électriques utilisées pour la traction de véhicules sont contrôlées avec le couple. Dans le cas d'une machine synchrone et asynchrone, ce couple est lisse, tandis que, dans la machine à réluctance variable, ce couple est ondulatoire en raison de la forme saillante du rotor. Une ondulation de couple élevé entraîne donc un bruit acoustique et dégrade les performances de la chaîne de traction électrique ainsi que le confort du conducteur.

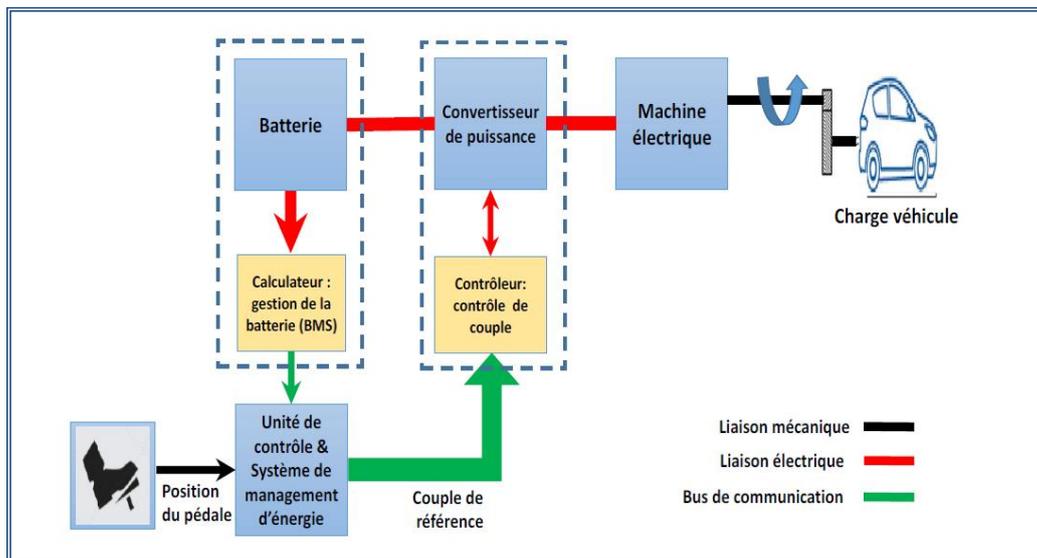


FIG III.1 – La chaîne de traction du véhicule électrique

III.2 - Alimentation de la MRV

La conception et le dimensionnement de la machine à réluctance variable sont indissociables de ceux de leurs convertisseurs. 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 MRV. Nous détaillerons les plus utilisées dans cette section.

III.2.1 - Convertisseurs en demi pont asymétriques

Contrairement aux machines synchrones et asynchrones, le sens du couple de la machine à reluctance 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 [49], 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 III.2 [50].

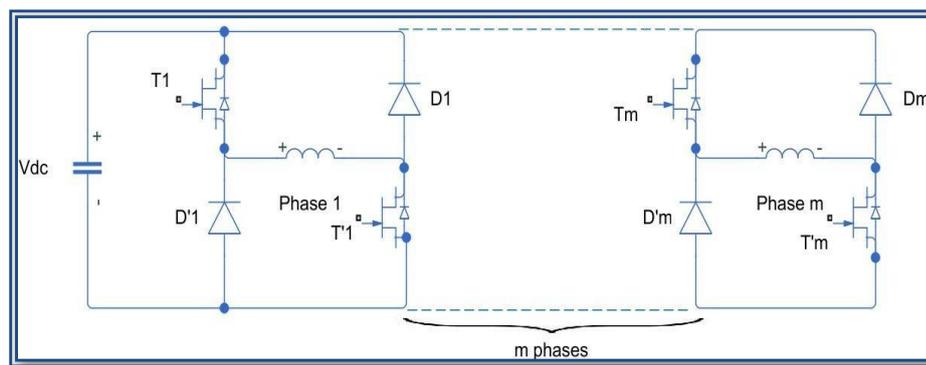


FIG III.2 – Schéma de la structure générale du convertisseur en demi-pont asymétrique.

Le fonctionnement d'un seul bras du convertisseur est décrit dans le tableau suivant :

Cas	T_1	\hat{T}_1	Tension de la phase
1	Conducteur	Conducteur	$+V_{dc}$ (phase de magnétisation)
2	Bloqué	Conducteur	0 (phase de roue libre)
3	Conducteur	Bloqué	0 (phase de roue libre)
4	Bloqué	Bloqué	$-V_{dc}$ (phase de démagnétisation)

Tableau III.1 – Séquences de conduction du convertisseur à demi pont asymétrique

Ce type de convertisseur rend la machine plus fiable grâce à sa possibilité d'alimenter indépendamment les phases. De plus, cette structure permet l'alimentation du MRV dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse et peut fonctionner dans une grande gamme de vitesse.

III.2 .2 - Convertisseur de Miller (Topologie m+1)

Une autre solution utilisée pour alimenter le MRV est le convertisseur de Miller (figure III.3). Cette structure présente l'avantage d'un nombre réduit d'interrupteurs (" $m + 1$ " pour un convertisseur de " m " phases) et d'un prix réduit [51].

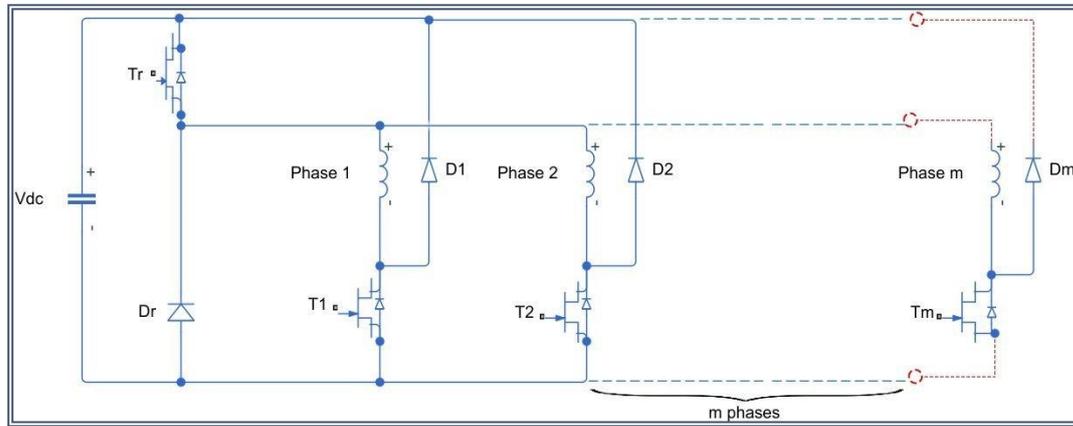


FIG III.3 – Schéma de la structure générale du convertisseur de Miller

Le convertisseur de Miller a été développé sur la base du celui à demi-pont asymétrique avec l'idée principale de réduire le nombre de composants. La partie inférieure du convertisseur est identique au convertisseur à demi-pont asymétrique, les commutateurs supérieurs étant remplacés par un seul dispositif commun à tous les bras. La phase à activer est sélectionnée à l'aide des commutateurs inférieurs T_1, T_2, \dots, T_m , dans la mesure où le commutateur supérieur Tr connecte l'autre extrémité de l'enroulement sous tension. Pour une phase j , les quatre états de fonctionnement sont résumés dans le tableau III.2.

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

Tableau III.2 –Séquences de conduction du convertisseur de Miller

III.2 .3 - Convertisseur à dissipation passive « R—Dump »

C'est un convertisseur avec un seul commutateur par phase. Sa structure est simple et peu coûteuse. Cependant, cette structure a un faible rendement en raison de l'utilisation d'une résistance " R " pour accélérer la dissipation d'énergie. La capacité " C_r " a pour rôle de fournir la tension nécessaire au blocage de la diode D_j lors de la conduction du transistor T_j . La structure générale du convertisseur R—Dump est donnée par la figure III.4 [52].

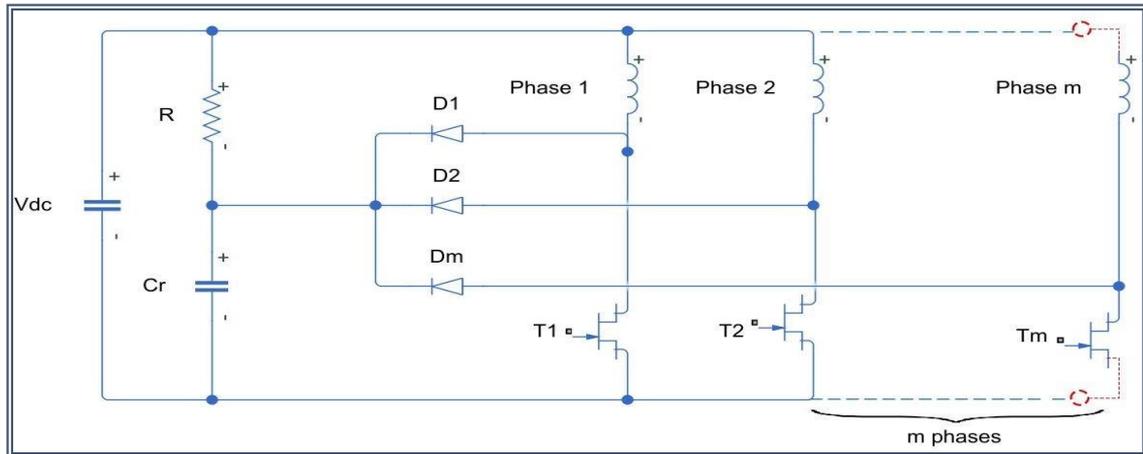


FIG III.4 – Schéma de la structure générale du convertisseur a dissipation passive « R—Dump ».

Ce convertisseur a deux modes de fonctionnement indiqués dans le tableau suivant :

Cas	T_j	Tension de la phase
1	Conducteur	$+V_{dc}$ (phase de magnétisation)
2	Bloqué	$V_{dc} - V_{cr}$ (phase de démagnétisation)

Tableau III.3 – Séquences de conduction du convertisseur a dissipation passive « R—Dump »

III.2.4 - Comparaison des trois convertisseurs pour l'alimentation du MRV

Une comparaison qualitative de trois convertisseurs en fonction des critères spécifiques pour la traction électrique est résumée dans le tableau III.4. [50]

Convertisseur / Critère	R-Dump	Miller	Demi-ponts asymétriques
Indépendance entre les phases	Complet	Partiel	Complet
Fonctionnement en roue libre	Permis	Permis	Permis
Nombre d'interrupteur	M	m+1	2 x m
Performance	Moyenne	Bien	Très bien
Contrôle	Simple	Complexe	Simple
Rendement	Faible	Élevé	Élevé
Tolérance aux défauts	Faible	Faible	Haute

Tableau III.4 – Comparaison des trois convertisseurs pour l'alimentation du MRV

Cette étude montre que le convertisseur demi-ponts asymétriques est le mieux adapté pour l'alimentation de la machine à reluctance variable pour une application à la traction électrique. Malgré le nombre de transistors est relativement grand, ce type de convertisseur offre plus d'avantages que les autres convertisseurs, tels que son contrôle simple, sa

robustesse et ses performances élevées. Le tableau III.5 ci-dessous résume les avantages et les inconvénients de chaque type de convertisseur.

Type de convertisseur	Avantages	Inconvénients
Demi-ponts asymétriques	Contrôle indépendant des phases ; Idéal pour les hautes performances en courant et en couple ; Permet une grande flexibilité dans le contrôle du courant de la machine; La tension des transistors est limitée à V_{dc} Performances de fonctionnement identiques dans les quatre quadrants.	Pertes dans les transistors; Commande complexe.
Miller	Convertisseur compact; Cout non élevé grâce au nombre réduit de transistors et de diodes.	Perte du contrôle indépendant des phases; Robustesse faible.
R-Dump	Convertisseur très compact; Cout moins élevé (un transistor par phase)	Pertes de puissance élevées ; Démagnétisation lente.

Tableau III.5 – Avantages et inconvénients de chaque type du convertisseur

III.3 - Commande classique PI

Dans cette section, nous nous intéressons à la commande classique PID pour la synthèse des régulateurs de vitesse. Cette régulation est très connue par les industriels pour sa simplicité, sa robustesse ainsi que sa facilité d'implémentation. Pour la machine à reluctance variable de la chaîne de traction des VE, les régulateurs choisis est de type PI pour les boucles de régulation en cascade vitesse dont le signal de commande est donné par :

$$u_{c(t)} = K_p e(t) + K_i \int e(t) \tau \quad (\text{III.1})$$

Où $e(t)$ est l'erreur entre la consigne et la mesure de la variable à contrôler. Les termes K_p et K_i sont respectivement les gains proportionnel et intégral. Le calcul de ces gains pour la boucle de vitesse est basé sur le modèle du MRV ou nous allons utiliser l'équation mécanique pour le régulateur PI vitesse.

Les paramètres de régulateur PI vitesse sont calculés en supposant que la dynamique des boucles de courants est négligeable par rapport à la dynamique de la boucle de vitesse. Ceci est dû à la constante de temps électrique qui très faible en comparaison à la constante de temps mécanique. Sur la base de cette hypothèse on ne considère que l'équation mécanique de la machine qui peut s'écrire sous la forme :

$$T_e = j \frac{d\Omega}{dt} + fr\Omega + T_l \quad (\text{III.2})$$

Pour le régulateur de vitesse, le signal de commande u , représente le couple de référence total de la machine T_e^* :

$$T_e^* = K_p(\Omega^* - \Omega) + K_i n \int (\Omega^* - \Omega) d\tau \quad (\text{III.3})$$

Où $(\Omega^* - \Omega)$ est l'erreur entre la vitesse consigne et la vitesse mesurée.

En remplaçant l'équation (III.2) dans (III.3) avec $T_e = T_e^*$ en boucle fermée, on peut écrire:

$$j \frac{d\Omega}{dt} + fr\Omega + T_l = K_p(\Omega^* - \Omega) + K_i n \int (\Omega^* - \Omega) d\tau \quad (\text{III.4})$$

Aussi on considère à tout instant t donné, que la vitesse de référence Ω^* et le couple charge T_L sont constants et donc leurs dérivés sont nuls. On dérive ensuite l'équation (III.4) :

$$j \frac{d^2\Omega}{dt^2} + (fr + K_p) \frac{d\Omega}{dt} + K_i \Omega = K_i \Omega^* \quad (\text{III.5})$$

On pose :

$$\begin{cases} x_1 = \Omega \\ x_2 = \frac{d\Omega}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Une présentation d'état de la boucle fermée (équation (III.6)) peut s'écrire :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_x + B_u \\ y = C_x \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec : $u = \Omega^*$ et $y = \Omega$, ou :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_i}{j} & -\frac{fr+K_p}{j} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_i}{j} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad C = [1 \quad 0] \quad (\text{III.8})$$

La fonction de transfert entre l'entrée et la sortie du système en boucle fermée est donné par :

$$G(s) = C(sI_2 - A)^{-1} B \quad (\text{III.9})$$

Où I_2 et s sont respectivement la matrice d'identité et la variable complexe de la transformation de Laplace. En remplaçant les matrices A , B et C par leurs expressions dans l'équation (III.8) :

$$G(s) = \frac{\frac{K_i}{j}}{s^2 + \left(\frac{fr+K_p}{j}\right)s + \frac{K_i}{j}} \quad (\text{III.10})$$

Le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée peut être décrit comme un dénominateur d'un système de second ordre standard :

$$s^2 + \left(\frac{fr}{J} + \frac{K_p}{J}\right)s + \frac{K_i}{J} = s^2 + 2\omega_n \xi s + \omega_n^2 \quad (\text{III.11})$$

Par identification, les paramètres du régulateur de vitesse PI sont donnés par :

$$\begin{cases} K_p = 2J\xi\omega_n - fr \\ K_i = J\omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Où ω_n est la pulsation naturelle et ξ est le coefficient d'amortissement du système boucle.

Afin d'obtenir une réponse en vitesse avec des très bonnes performances en boucle fermée, le régulateur de vitesse ainsi conçu sera implémenté avec un anti-emballement sur le terme intégral (anti-windup integrator). La figure FIG III.5 montre la structure du régulateur PI vitesse ou les gains K_p , K_i et K_a seront choisis par la suite.

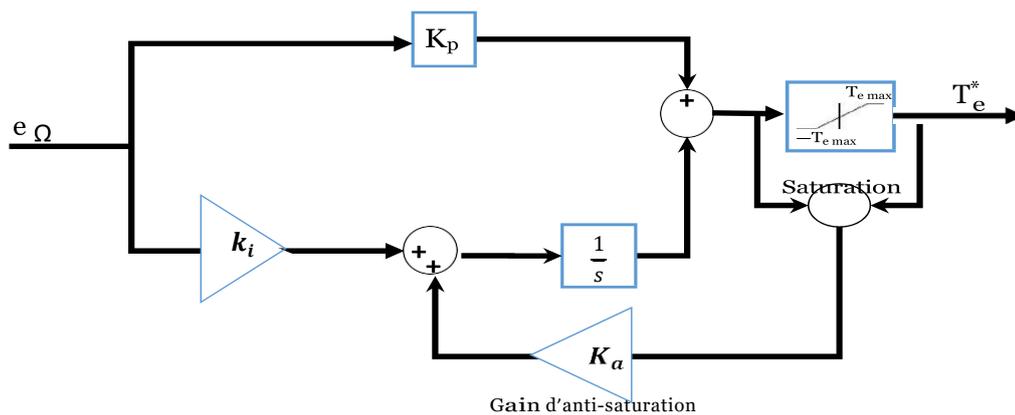


FIG III.5 – Structure du contrôleur PI vitesse

III.4 - Résultats de la simulation de la MRV avec contrôle PI

Sous l'environnement Matlab Simulink nous avons réalisé la simulation de l'MRV avec un contrôle de vitesse assuré par des régulateur PI et une commande indirecte de couple (voir la figure III.6). Le convertisseur asymétrique est couramment utilisé pour les MRV. Le convertisseur pour une phase est illustré à la (figure III.7). Lorsque les deux commutateurs sont activés, l'état est défini comme « magnétisant » (état 1). Lorsqu'un interrupteur est sur ON et l'autre sur OFF, l'état est défini comme « roue libre » (état 0). Lorsque les deux commutateurs sont fermés, l'état est défini comme « démagnétisation » (état -1) (Voir figure III.8).

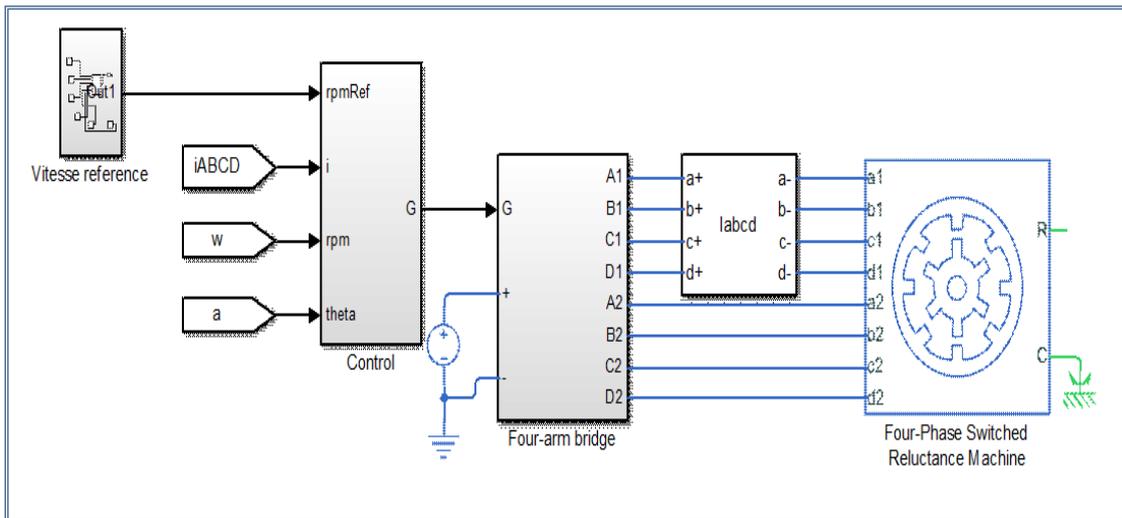


FIG III.6 – Schéma bloc MRVCE de contrôle de vitesse avec régulateur PI

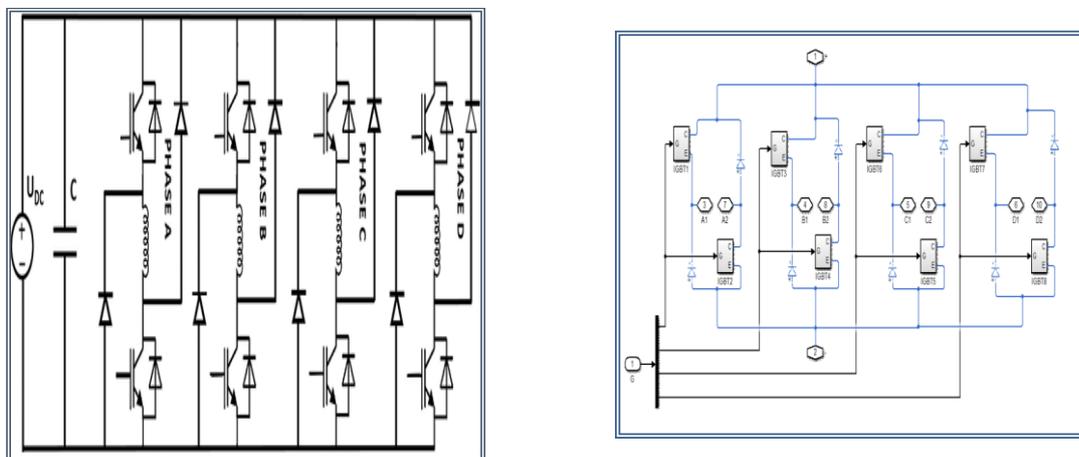


FIG III.7 – Topologie de convertisseur en pont asymétrique pour MRV 8/6 pôles de quatre phases

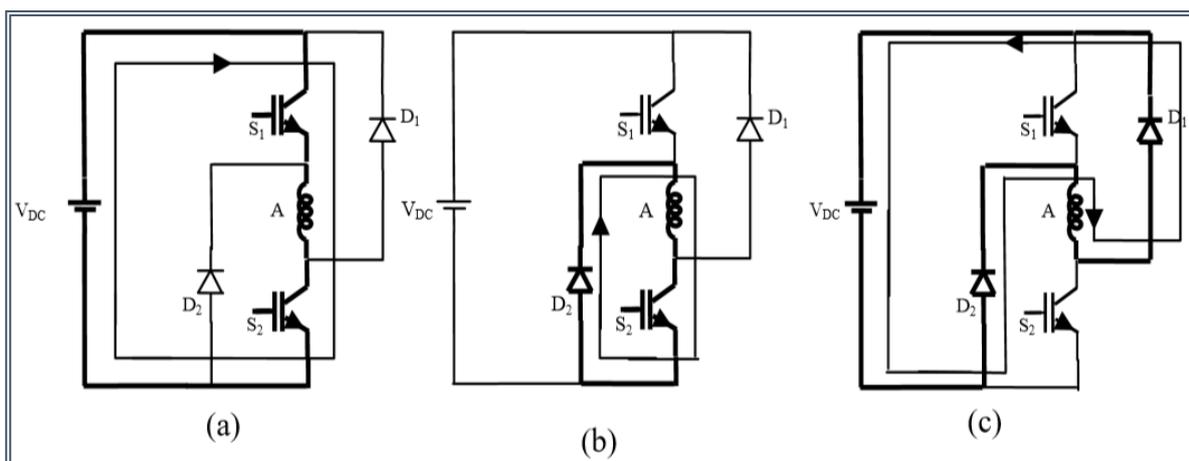


FIG III.8 – Etats de tension de phase du MRV

Pour la simulation nous avons choisi un profil qui couvre toute la plage de vitesse de l’MRV en choisissant trois points de fonctionnement : basse vitesse (4000 tr/min), vitesses nominale (6000tr/min) et maximale (10000tr/min). La figure III.9 montre les paramètres de régulateur PI et la figure III.10 montre la réponse en vitesse par rapport au profil choisi. Nous constatons que la réponse en vitesse suit bien le profil avec une erreur statique et erreur de traînage qui disparaissent en régime établi pour chaque phase de fonctionnement. Cette erreur est due à la non linéarité de modèle et que le régulateur PI, qui est linéaire n’est pas adapté pour la correction en régime transitoire. Aussi nous constatons que sur tout le profil de vitesse la réponse est atteinte sans aucun dépassement grâce aux paramètres choisis du régulateur.

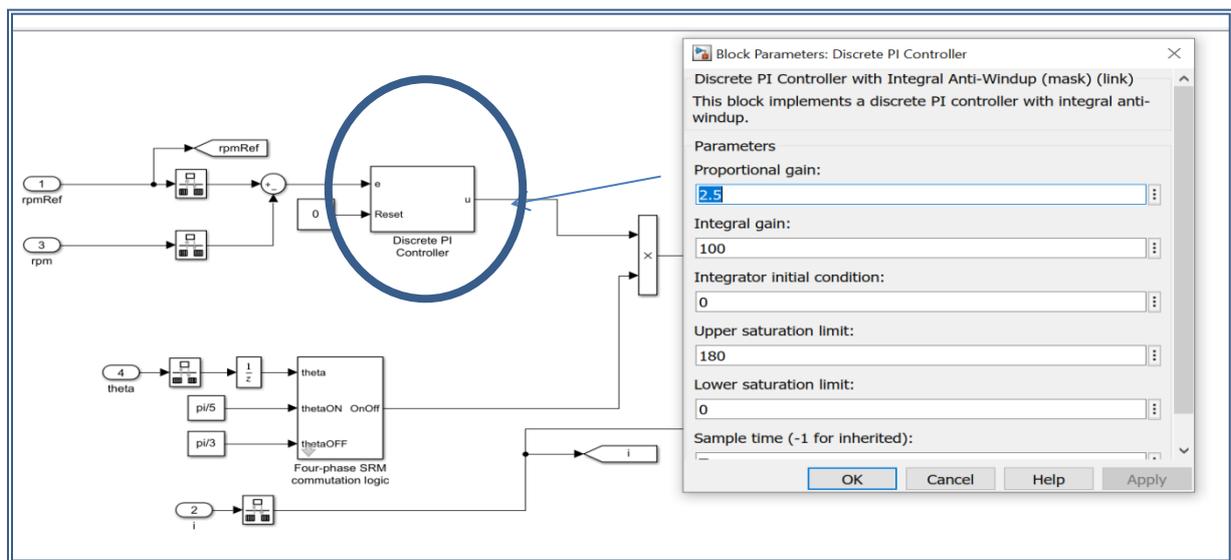


FIG III.9 – Paramètre de régulateur PI

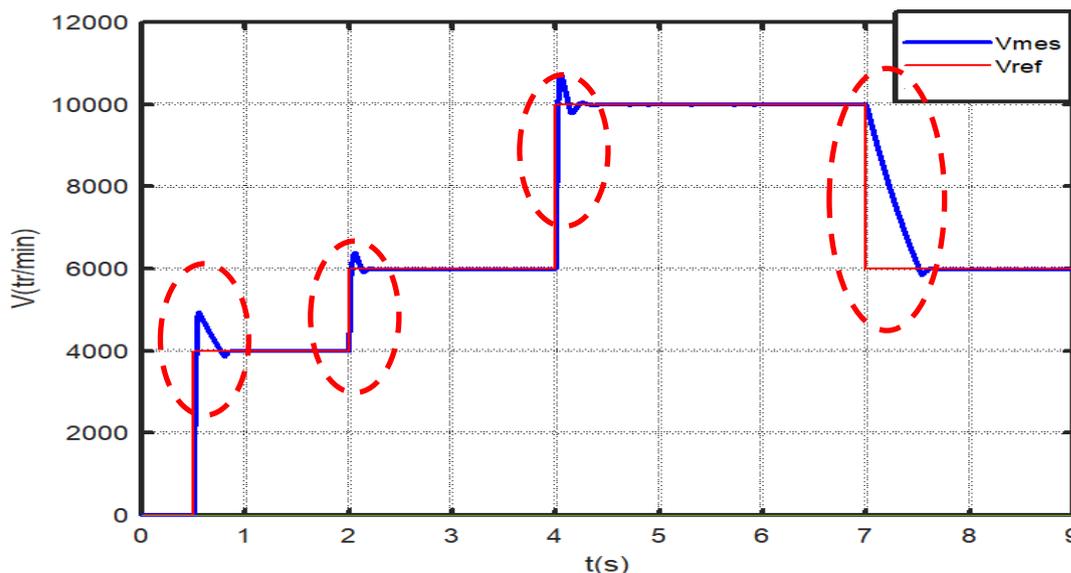


FIG III.10 – Réponse en vitesse par les régulateurs PI

La figure III.11 illustre l'évolution temporelle des quatre courants statoriques par rapport au profil de vitesse choisi. Aussi, les zooms sur cette figure montrent l'évolution successive des courants à basse et haute vitesses. En effet, les courants sont bien déphasés et ont la même allure. De même la figure III.13 montre comme exemple la réponse en courant de la phase A pour la vitesse maximal. Nous constatons que la valeur du courant mesuré pour la vitesse maximale correspond bien à la valeur de courant maximal indiqué sur la plaque signalétique voir annexe B.

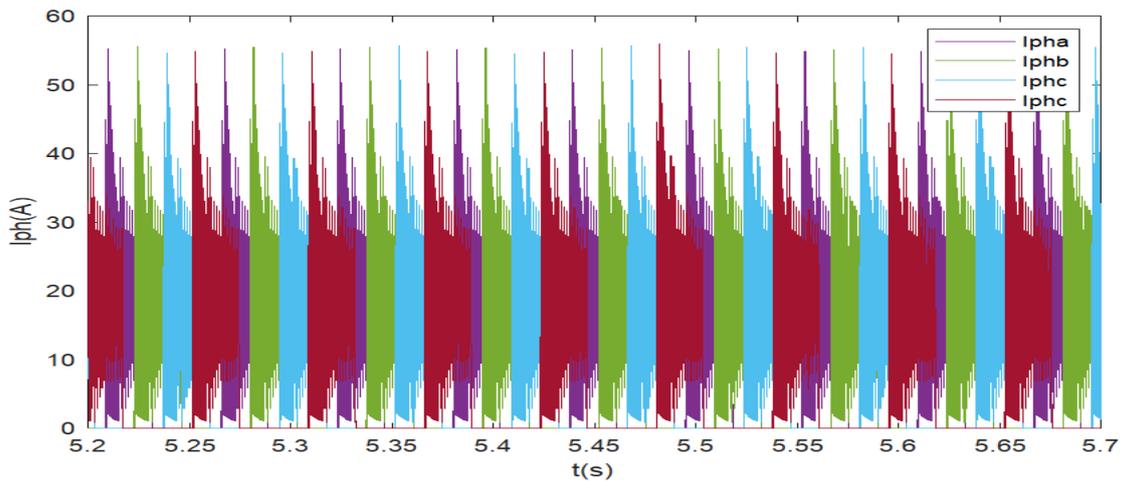


FIG III.11 – Réponse des courants de la phase A et B et C et D par les régulateurs PI

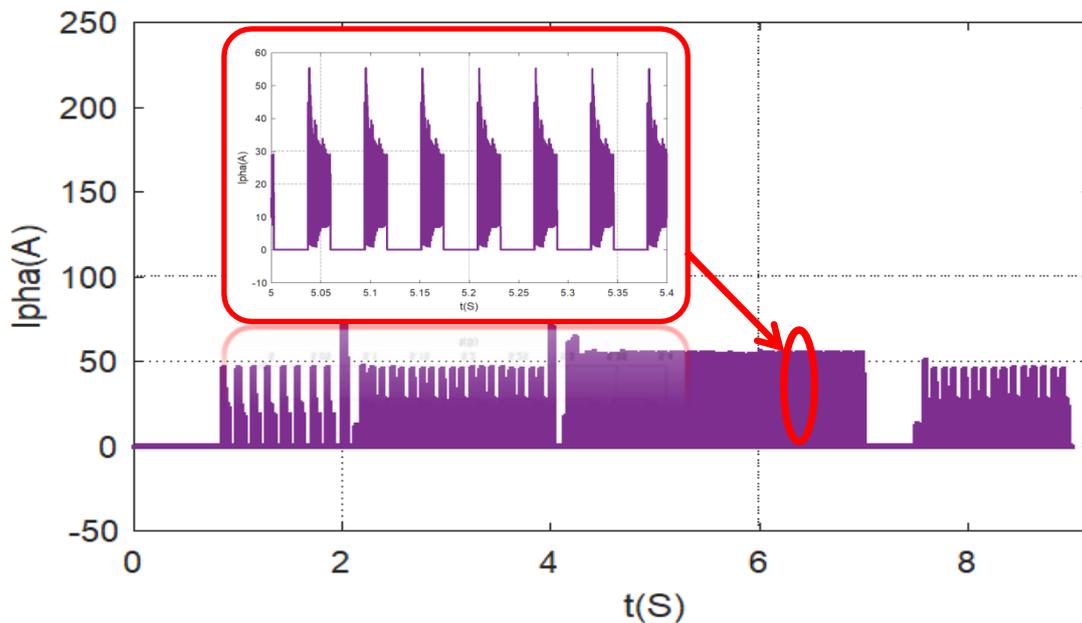


FIG III.12 – Réponse en courant de la phase A par les régulateurs PI

Étant donné que la régulation en vitesse est bien réalisée, nous pouvons, tracer l'évolution du couple. Dans cette stratégie, la commande du couple est une commande indirecte. Nous constatons que le couple machine suit bien le couple de référence mais avec

des ondulations qui sont plus importantes à haute vitesse. Ces ondulations sont dues principalement au non linéarité du modèle de l'MRV et des signaux PWM. En effet, ces ondulations font partie des inconvénients des machines à réluctance variable et qu'on peut les réduire par l'optimisation de la commande. La figure III.13 montre l'évolution du couple machine par rapport au profil du changement de la vitesse.

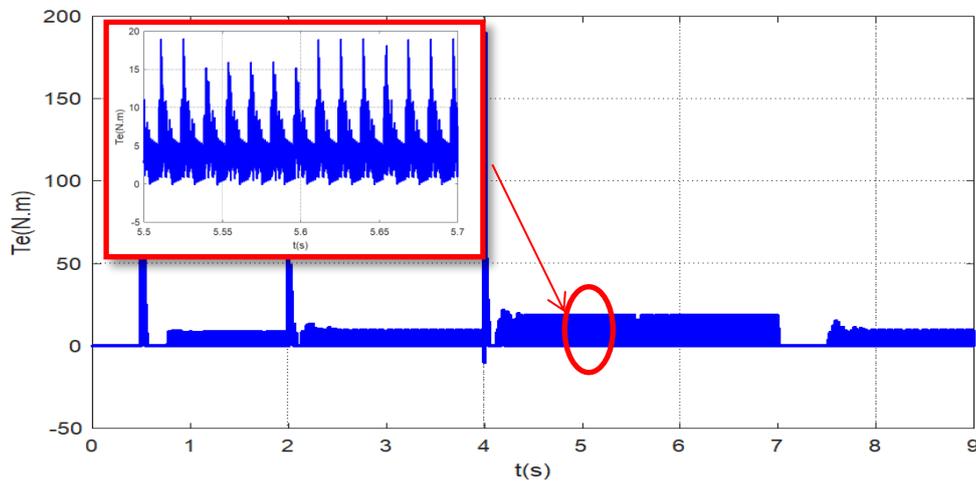


FIG III.13 – Couple par régulation avec régulateurs PI

Les figures III.14 et 15 suivantes représente respectivement la variation de la vitesse et du couple et des quatre courants de phases.

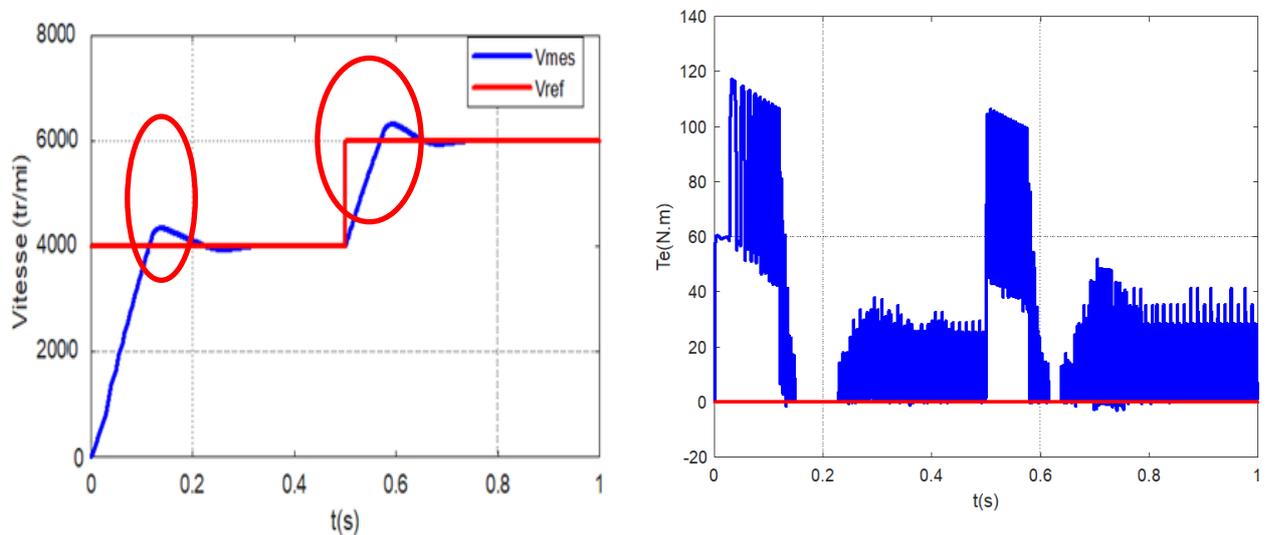
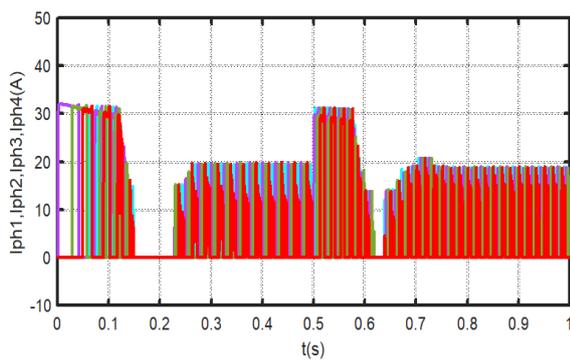
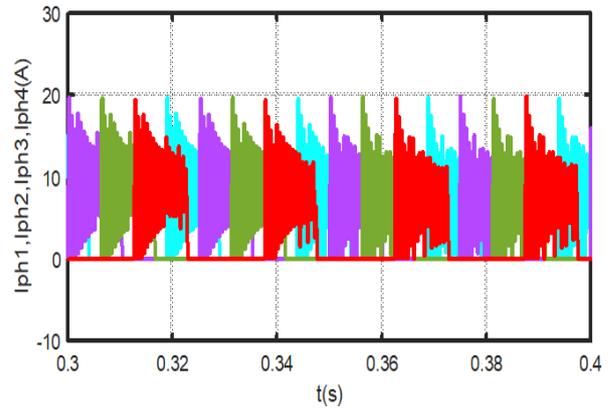


FIG III.14 – Contrôle de vitesse de MRV avec PI



Courants de l'MRV avec PI



Zoom de Courants de l'MRV avec PI

FIG III.15 – Courants de l'MRV avec PI

III.4 - Problématique

L'objectif de notre étude consiste principalement à intégrer une machine à réluctance variable à quatre phases de type 8/6 pôles, dans la chaîne de traction du VE. La commande de cette machine est basée sur une stratégie de régulation de la vitesse à base de régulateurs classiques du type PI. La synthèse de ces lois de commande conventionnelles pour la commande de la machine à réluctance variable fournit de bonnes propriétés. Néanmoins, elles ne peuvent pas garantir de hautes performances et robustesse que demande le domaine d'applications rigoureux des véhicules électriques. Pour assurer un fonctionnement et améliorer les performances de la chaîne de traction, nous allons proposer des commandes robustes et nous nous intéressons particulièrement à éliminer les capteurs de position, sachant que leur intégration mécanique dans la chaîne de traction pose des problèmes tels que le coût de la maintenance et l'encombrement mécanique. Le capteur de position peut-être le signe de défauts qui peuvent conduire à la perte totale de l'information ou à sa dégradation, par conséquent une baisse significative des performances et un dysfonctionnement de la chaîne de traction. L'ondulation de couple empêche l'MRV à atteindre l'excellence des performances et de se classer en haut de la liste des actionneurs électriques. Notre travail futur se focalisera sur l'amélioration des ces performances à travers une commande DTC capable de minimiser les ondulations du couple et le contrôle de la vitesse par le régulateur intelligent de logique flou (FLC).

III.5 - Principes généraux de la DTC

La commande directe du couple d'un MRV est basée sur la détermination directe de la séquence de commande à appliquer aux interrupteurs d'un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation des régulateurs à hystérésis, dont la fonction est de contrôler l'état du système ; à savoir ici l'amplitude du flux statorique et du couple

électromagnétique. Ce type de stratégie se classe donc dans la catégorie des commandes en amplitude, par opposition aux lois de commande plus classiques, basées sur un réglage de la valeur moyenne du vecteur de la tension par M.L.I. La commande par DTC d'un MRV peut être schématisée par la (figure III.16).

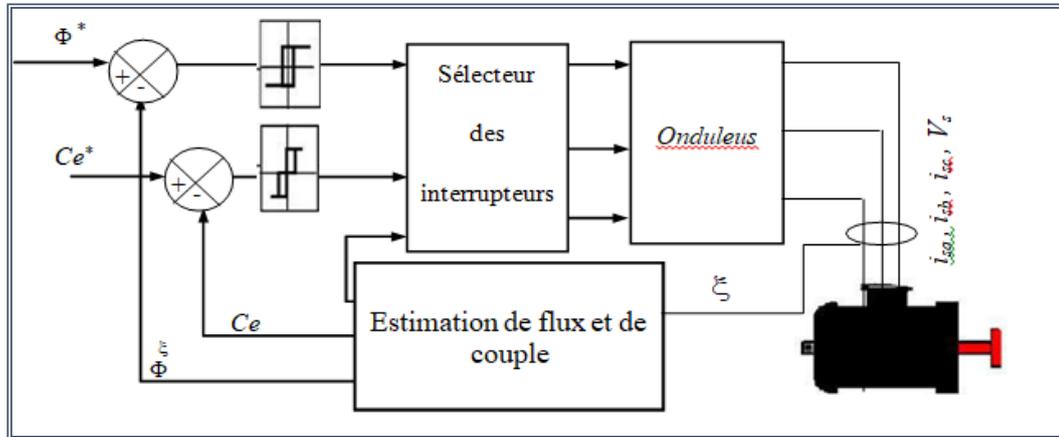


FIG III.16 – Schéma structurel d'une commande DTC appliquée à une MRV

Le DTC applique un principe de commande à courant alternatif optimisé, dans lequel un onduleur commande directement les paramètres flux et couple du moteur. Il présente des avantages importants par rapport aux entraînements à courant continu, à commande par modulation de largeur d'impulsion et à la commande vectorielle, avec lesquels il se trouve en concurrence dans un grand nombre d'applications industrielles [53]. Avec cette technique révolutionnaire de commande, l'orientation du flux est réalisée sans boucle de retour utilisant une modélisation du moteur pour calculer directement le couple.

Les variables de commande sont le flux magnétisant et le couple du moteur. Avec la DTC, on n'a pas besoin d'un modulateur, ni d'un tachymètre ou bien d'un encodeur de position pour assurer le retour d'information de la vitesse ou de position.

Les méthodes de commande directe du couple (DTC) consistent à commander directement la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur à partir des valeurs calculées du flux statorique et du couple. La commande des interrupteurs a pour but de donner au vecteur représentant le flux statorique la direction déterminée par les valeurs de consigne.

Pour connaître l'état électromagnétique du moteur afin de déterminer la commande des interrupteurs de l'onduleur, il faut disposer d'un modèle approprié de la machine. A partir des mesures de la tension continue à l'entrée de l'onduleur et des courants statoriques, le modèle donne à chaque instant [54]:

- Le flux statorique réel de la machine,
- Le couple réel qu'elle développe,
- Sa vitesse de rotation.

La mesure de la vitesse de l'arbre n'est pas nécessaire, ce qui est un grand avantage de ces méthodes. Le flux et le couple ainsi calculés sont comparés aux valeurs de référence pour déterminer les instants de commande des interrupteurs afin de maintenir le flux constant.

III.5.1 - Contrôle de flux statorique et du couple électromagnétique

➤ Les équations mathématiques du DTC [45] appliquées au MRV sont décrites ci-dessous.

La sortie du couple moteur peut être trouvée en utilisant l'équation électromagnétique :

$$v = Ri + \frac{d\psi(\theta,i)}{dt} \quad (\text{III.12})$$

Où $\psi(\theta, i)$ est la fonction non linéaire de la liaison de flux de phase en fonction de la position du rotor θ et du courant i . En développant l'équation ci-dessus, vous obtenez l'équation (III.13) :

$$v = Ri + \frac{\partial\psi(\theta,i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\psi(\theta,i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{III.13})$$

Ainsi l'équation du flux de puissance peut être écrite comme :

$$vi = Ri^2 + i \frac{\partial\psi(\theta,i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + i \frac{\partial\psi(\theta,i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{III.14})$$

Maintenant, le flux de puissance efficace P_{eff} de la source électrique peut être défini :

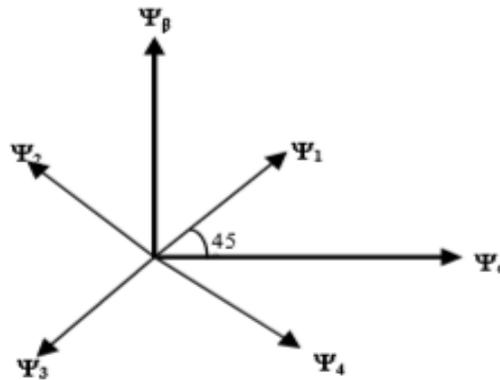


FIG III.17 – Définition de - axe pour la tension du moteur

$$P_{eff} = ei \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Où } e = (v - Ri) \quad (\text{III.16})$$

Ainsi dans un temps différentiel dt , l'énergie électrique différentielle dW_e transférée de la source est donnée par :

$$dW_e = eidt \quad (\text{III.17})$$

Pour trouver une expression pour la production de couple moteur, l'équation d'énergie s'écrit :

$$dW_e = dW_m + dW_f \quad (\text{III.18})$$

Où dW_m et dW_f sont respectivement l'énergie mécanique différentielle et l'énergie de champ. L'énergie du champ peut être séparée en ses composants constitutifs comme indiqué dans l'équation (III.18).

$$dW_f = \frac{\partial W_f}{\partial x} di|\theta = \cos \tan t + \frac{\partial W_f}{\partial \theta} d\theta|i = \cos \tan t \quad (\text{III.19})$$

De la considération de l'énergie de champ stockée, il peut être démontré que [47] :

$$dW_e = i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i} di|\theta = \cos \tan t + i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} d\theta|i = \cos \tan t \quad (\text{III.20})$$

$$dW_f|\theta = \cos \tan t = i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i} di|\theta = \cos \tan t \quad (\text{III.21})$$

Par substitution d'équation (III.19) dans l'équation(III.20) on peut constater que :

$$dW_m = i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial i} d\theta - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} d\theta \quad (\text{III.22})$$

Le couple instantané est défini par :

$$T = \frac{dW_m}{d\theta} \quad (\text{III.23})$$

Ainsi en substituant Equation (III.22) dans l'équation(III.23) l'expression de la production de couple instantanée d'une phase de MRV peut s'écrire :

$$T = i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \quad (\text{III.24})$$

Il s'agit d'une variante rarement utilisée de l'équation de couple conventionnelle. En raison de la saturation du MRV, l'influence du deuxième terme dans l'équation (III.24) Est négligeable. Par conséquent, en utilisant cette approximation, l'équation suivante pour la production de couple peut être dérivée comme suit :

$$T \approx i \frac{\partial \psi(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (\text{III.25})$$

Dans l'MRV, les entraînements unipolaires sont normalement utilisés et donc le courant dans une phase moteur est toujours positif. Par conséquent, à partir de l'équation (III.25) le signe du couple est directement lié au signe de $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$. En d'autres termes, pour produire un couple positif, l'amplitude du flux statorique doit augmenter par rapport à la position du rotor,

alors que pour produire un couple négatif, la variation du flux statorique doit diminuer par rapport au mouvement du rotor. Une valeur positive de $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ peut être définie comme une accélération du flux, tandis qu'une valeur négative de $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ peut être définie comme une décélération du flux. La technique DTC est clairement expliquée dans [55][56].

Comme dans le schéma DTC conventionnel, si la liaison de flux statorique se situe dans la $k^{\text{ème}}$ zone, où $k = 1$ à 8, l'amplitude du flux peut être augmentée en utilisant les vecteurs de commutation V_{k+1} et V_{k-1} et peut être diminuée en utilisant les vecteurs V_{k+2} et V_{k-2} . Ainsi, chaque fois que la liaison de flux statorique atteint sa limite supérieure dans la bande d'hystérésis, elle est réduite en appliquant des vecteurs de tension dirigés vers le centre de l'espace vectoriel de flux et vice-versa [45].

Comme détaillé précédemment, le couple est contrôlé par une accélération ou décélération du flux statorique par rapport au mouvement du rotor. Par conséquent, si une augmentation du couple est requise, des vecteurs de tension qui font progresser la liaison de flux statorique dans le sens de rotation sont sélectionnés. Cela correspond à la sélection des vecteurs V_{k+1} et V_{k+2} pour une liaison de flux statorique dans la $k^{\text{ème}}$ zone. Si une diminution du couple est nécessaire, des vecteurs de tension sont appliqués qui ralentissent le stator (voir figure III.18).

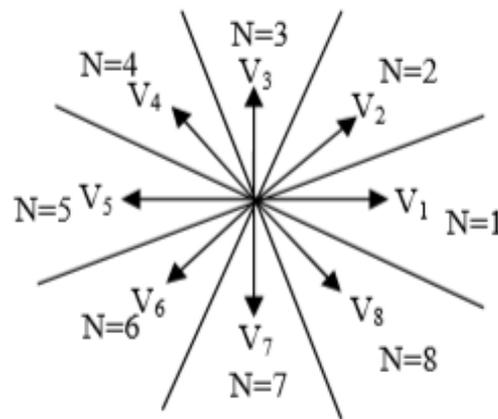


FIG III.18 – Définition des vecteurs de tension du moteur MRV pour DTC

Les flux dans les quatre phases sont résolus en axes α - β fixes en utilisant la transformation en 4 phases montrée sur la figure FIG III.18. L'équation pour les variations du couple électromagnétique peuvent être contrôlées uniquement à partir de la vitesse de rotation du vecteur flux $\vec{\Phi}$. Le table III.6 montre l'évolution des deux grandeurs flux et couple pour chacun des quatre vecteurs V_{i+1} , V_{i+2} , V_{i-1} , V_{i-2} qui peuvent être appliqués dans la zone Z_i .

Lorsque le flux se trouve dans une zone i , le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs de tensions suivantes :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors l'amplitude du flux Φ_i croit et le couple T_{em} croit;

- Si V_{i+2} est sélectionné alors l'amplitude du flux Φ_s décroît et le couple T_{em} croît;
- Si V_{i-1} est sélectionné alors l'amplitude du flux Φ_s croît et le couple T_{em} décroît;
- Si V_{i-2} est sélectionné alors l'amplitude du flux Φ_s décroît et le couple T_{em} décroît;

Les flux dans les axes α - β est obtenue comme :

$$\psi_\alpha = \psi_1 \cos 45^\circ - \psi_2 \cos 45^\circ - \psi_3 \cos 45^\circ + \psi_4 \cos 45^\circ \tag{III.26}$$

$$\psi_\beta = \psi_1 \cos 45^\circ + \psi_2 \cos 45^\circ - \psi_3 \cos 45^\circ - \psi_4 \cos 45^\circ \tag{III.27}$$

$$\psi_s = \sqrt{(\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2)} \tag{III.28}$$

$$\delta = \arctan \left[\frac{\psi_\beta}{\psi_\alpha} \right] \tag{III.29}$$

Tableau III.6 – Evolution des grandeurs flux et couple en fonction du vecteur V_i appliqué dans la zone Z_i				
Vecteur Φ_s	V_{i+1}	V_{i-1}	V_{i+2}	V_{i-3}
Φ_s	→	→	↘	↘
T_{em}	→	↘	↗	↘

Ce tableau présente la localisation des vecteurs de tensions :

Tableau III.7 _ Tableau de localisation des vecteurs de tensions.									
N		1	2	3	4	5	6	7	8
$\Psi Q=1$	$T_Q=1$	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V1
	$T_Q=0$	V7	V8	V1	V2	V3	V4	V5	V6
$\psi Q=0$	$T_Q=1$	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V1	V2
	$T_Q=0$	V6	V7	V8	V1	V2	V3	V4	V5

III.6 - Logique Floue

Dans le cadre de recherche pour le développement de nouvelles technologies basées sur l'intelligence artificielle, la logique floue a reçu un immense intérêt par les chercheurs et les industriels depuis le début de la deuxième moitié du dernier siècle. Avant cette tournure dans la définition de la logique, tous les algorithmes et les procédés se basaient sur la logique classique [57]. La logique classique n'admet aucun état entre le vrai et faux, ou aucune valeur entre le 0 et 1, contrairement à la logique floue qui a l'avantage de traiter même les valeurs entre 0 et 1 en se basant sur le raisonnement humain [57]-[61].

Pour notre cas d'étude, le réglage de vitesse de déplacement de véhicule sera considéré remplacé par un régulateur flou. Dans un premier temps, la vitesse de déplacement pourra être estimée soit : basse, moyenne, ou élevée. Si nous nous basons sur la logique classique pour régler la vitesse du véhicule à une vitesse moyenne désirée, nous nous retrouvons avec un algorithme simple comme le montre la figure III.19 :

- Si la vitesse du véhicule est faible : Accélérer;
- Si la vitesse du véhicule est moyenne : Ne rien faire;
- Si la vitesse du véhicule est élevée : Décélérer.
- Si la vitesse du véhicule est élevée : Décélérer.

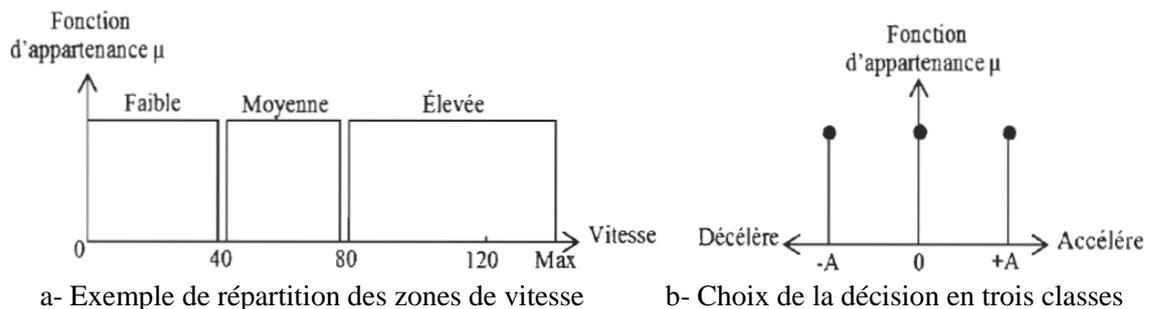
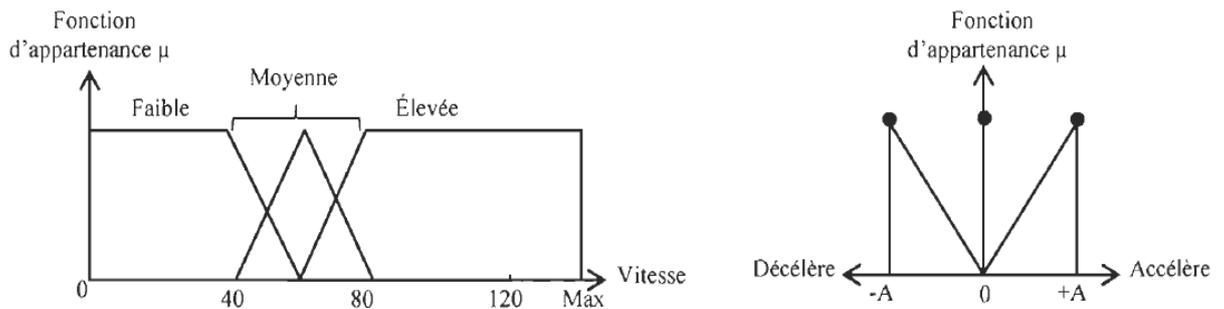


FIG III.19 – Réglage de vitesse d'un véhicule selon la logique classique

Nous constatons que ce raisonnement est loin d'être semblable au raisonnement humain qui est capable d'être plus précis au niveau de classification. Une vitesse de 38 km/h d'après la logique booléenne appartient à l'intervalle vitesse faible, alors que le cerveau humain voit qu'elle pourrait appartenir autant à l'intervalle vitesse moyenne, qu'à l'intervalle vitesse faible. C'est de là que le principe de la logique floue a été inspiré, le degré d'appartenance peut varier entre 0 et 1 d'une façon que la somme de tous donne 1. La vitesse du véhicule n'est pas toujours soit nettement faible, moyenne ou élevée, elle peut être par exemple à 80% faible, 20% moyenne et 0% élevée, et dans ce cas la décision ne va pas être la même qu'avec la logique classique, parce que la logique floue prend en considération le passage d'intervalle.

Dans l'exemple considéré (Fig. III.20) :

- Pour une vitesse inférieure à 40Km/h, la vitesse est faible;
- Pour une vitesse inférieure à 60Km/h et supérieure à 40Km/h, on hésite entre faible et moyenne;
- Pour une vitesse inférieure à 80Km/h et supérieure à 60Km/h, on hésite entre moyenne et élevée;
- Pour une vitesse supérieure à 80Km/h, la vitesse est élevée.



a- Exemple de répartition des zones de vitesse b-Choix de la décision en trois classes

FIG III.20 – Exemple de réglage de vitesse d'un véhicule selon la logique floue

Un contrôleur logique flou typique est représenté dans la figure III.21 Basé sur la logique floue, le noyau du dispositif de commande se trouve dans sa base de connaissances, constituée de règles floues qui décrivent la réaction du régulateur, et un système d'inférence qui combine les règles actives selon les entrées présentées au contrôleur [65],[67]. Comme les règles et le système d'inférence agissent sur des sous-ensembles flous, il est nécessaire de convertir les données nécessaires à la régulation provenant du monde extérieur en valeurs linguistiques qui peuvent être manipulées par les fonctions de la base de connaissances de la logique floue [68]. Les décisions prises par la base de connaissances sont en général des valeurs linguistiques qui doivent être converties en valeurs numériques afin de les appliquer sur le processus à contrôler. De ce fait, un bloc logique flou peut être divisé sous 5 sous-blocs:

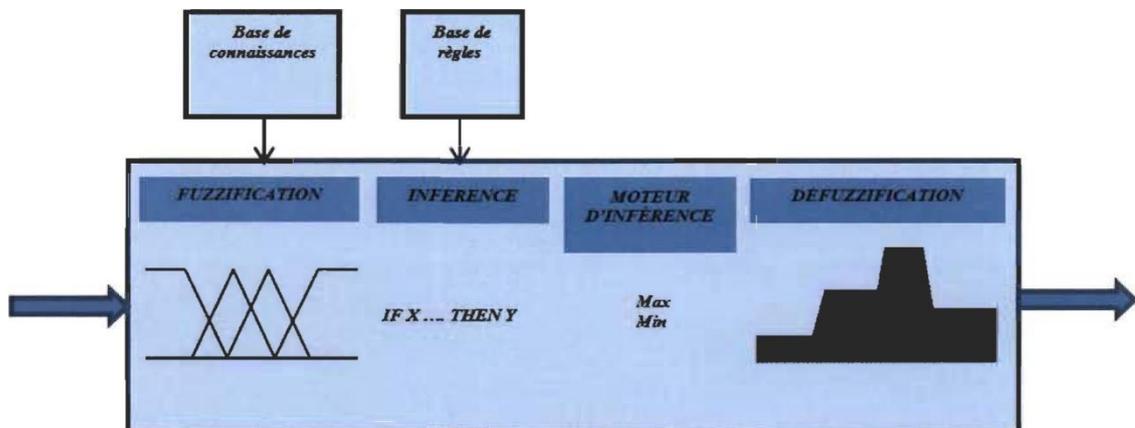


FIG III.21 – Schéma des différentes opérations dans un bloc logique flou

III.7 - Résultats la commande DTC de la MRVCE avec contrôle de vitesse par FLC

Le modèle non linéaire complet du MRV 8/6 avec 4 phases et un DTC est illustré à la (FIG III.22). La spécification du MRV est donnée à l'Annexe B. Le modèle comprend un système électrique, un système mécanique, un bloc de détection de position, un convertisseur asymétrique et un bloc DTC et le régulateur à logique flou (voir figures III.23 ;24.25).

Les performances du variateur MRV basé sur DTC avec régulateur logique flou sont analysées pour des vitesses de références de 4000tr/ min et 6000tr/min . La vitesse réelle est comparée à la vitesse de référence. Nous remarquons que , l'utilisation des régulateur à logique flou réduit l'erreur d'estimation de vitesse voir la figure III.28 ,la figure III.26 représente l'image des courants dans les quatre phases .

La Figure III.26 montre la réponse totale du couple sur toute la durée de la simulation. Pendant la période d'accélération, le couple est maintenu en suivant une bande d'hystérésis jusqu'à ce que l'état stationnaire soit atteint. Lorsque l'état stationnaire est atteint, le couple développé par le moteur est maintenu au couple de charge. Ainsi, l'ondulation du couple est minimisée à l'état stationnaire et pendant la période d'accélération. D'après les résultats, nous remarquons que les ondulations du couple ont diminué par rapport aux résultats obtenus avec un contrôle PI simple et grâce au contrôle direct du couple (DTC) et le contrôleur logique flou nous avons pu améliorer les performances de la machine.

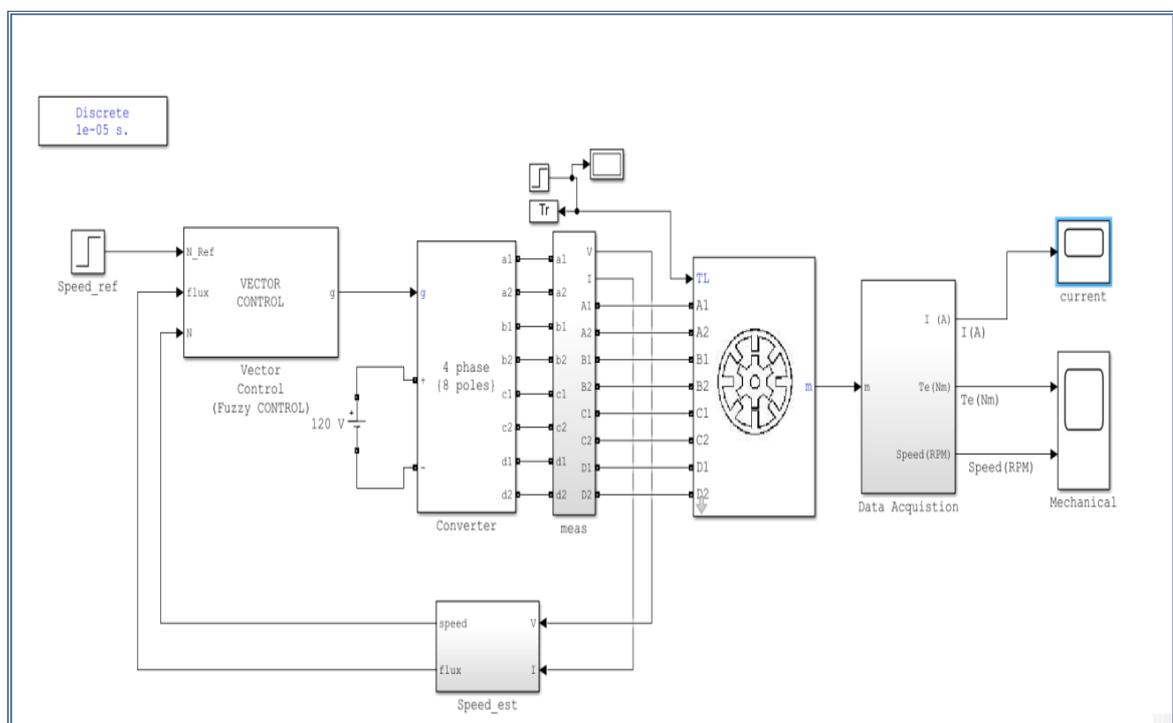


FIG III.22 – Schéma fonctionnel du DTC

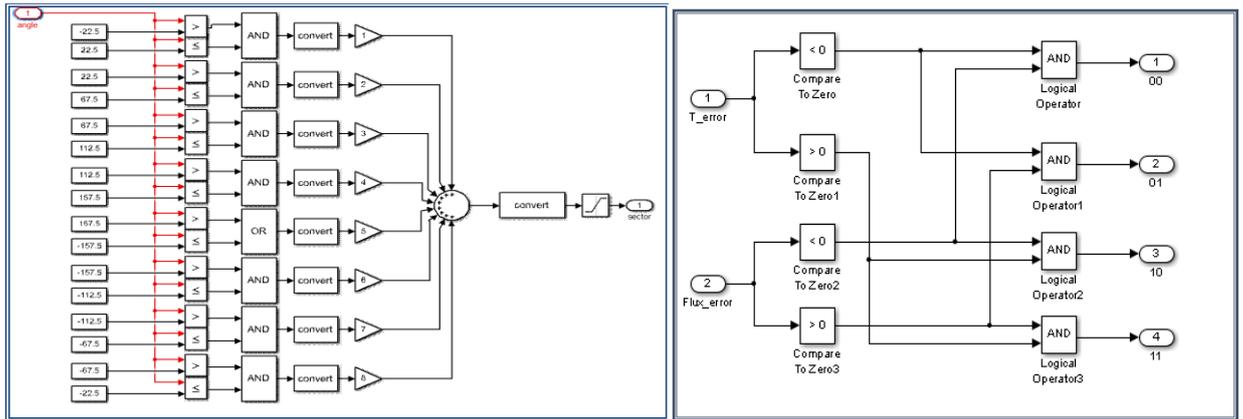


FIG III.23 – Bloc de sélection des secteurs d'après la position de couple et de flux

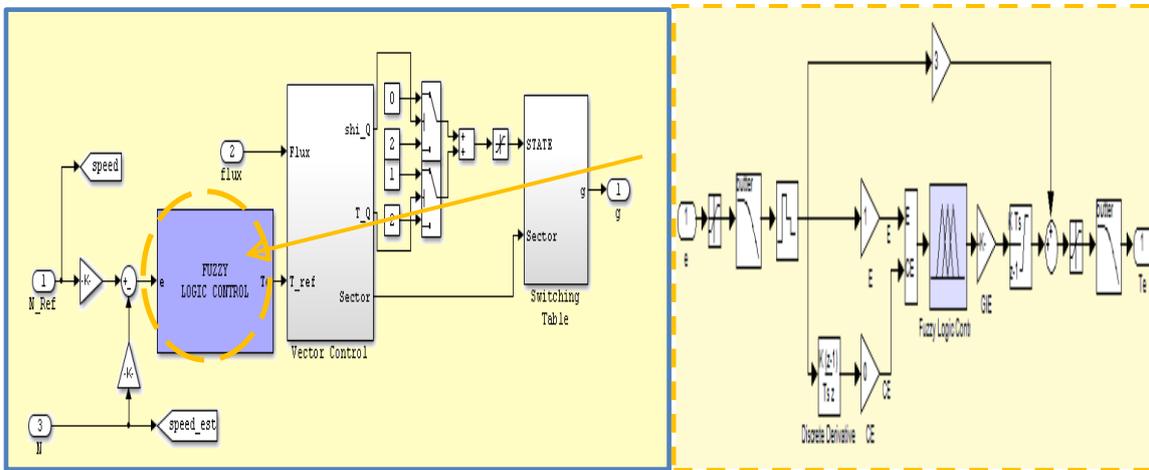


FIG III.24 – Bloc de contrôle de vitesse par le régulateur FLC

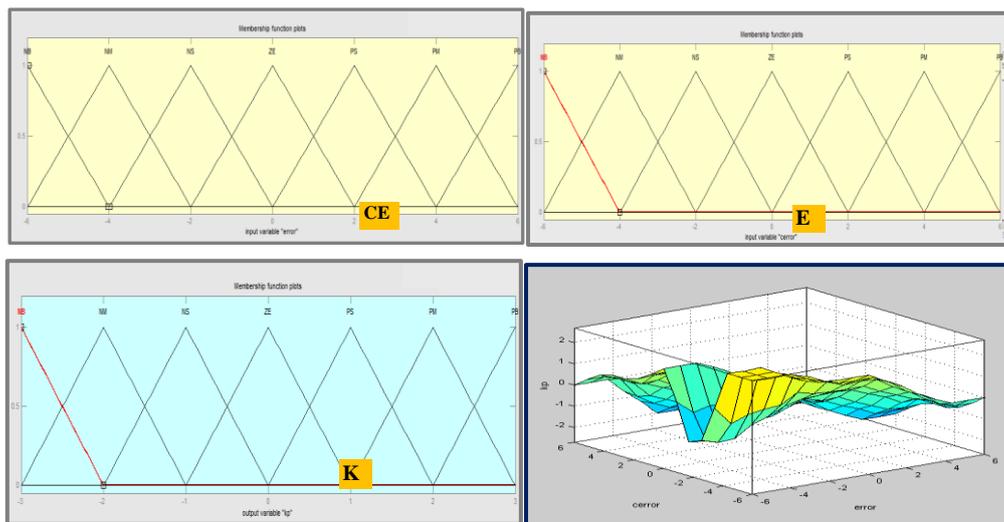


FIG III.25 – Schéma des différentes opérations dans le bloc logique flou

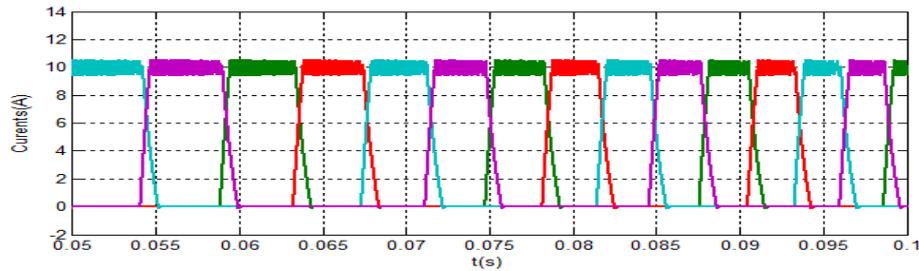


FIG III.26 – Image des courants

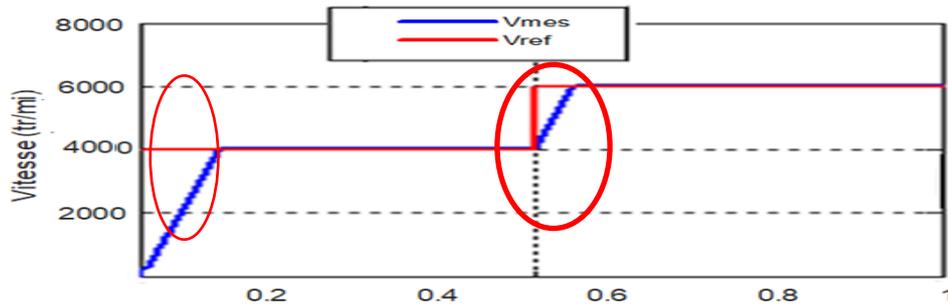


FIG III.27 – Contrôle de vitesse de MRV avec DTC et logique floue

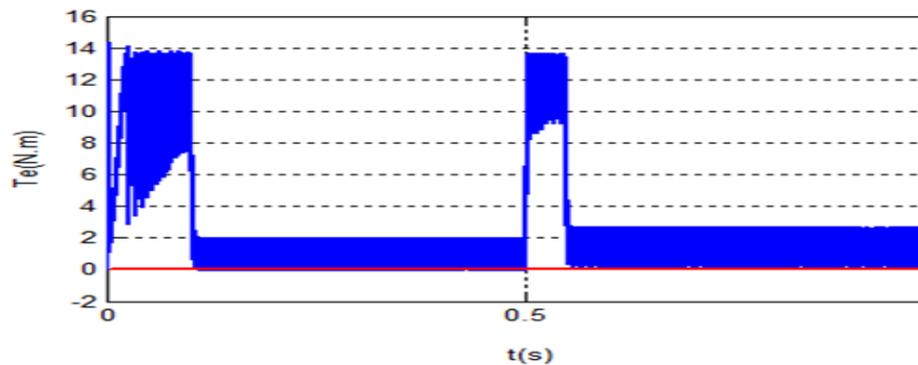


FIG III.28 – Couple de MRV avec DTC et logique floue

III .8 - Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a réalisé une commande de la machine à reluctance variable par régulateur PI simple. Selon les résultats obtenus nous avons remarqué une très importante ondulation du couple ce qui a diminué les performances du MRV, par contre la vitesse mesurée suit bien la vitesse de référence. Afin d'améliorer les performances de la machine nous avons réalisés la deuxième partie qui concerne la commande de DTC pour minimiser les ondulations du couple avec un contrôle assuré par des régulateur de logique floue. D'après les résultats obtenus nous remarquons que les ondulations du couple ont nettement diminué et le contrôle avec les régulateurs à logique floue a réduit l'erreur d'estimation de vitesse. Nous pouvons conclure qu'avec le contrôle DTC et le régulateur floue les performances de la machine ont été considérablement amélioré.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Sur la base des travaux disponibles dans la littérature, on a présenté les éléments de base de la chaîne de traction des VE en soulignant sur les différentes technologies employées. Notre choix s'est porté sur le moteur à reluctance variable (MRV) du fait qu'il bénéficie d'un rotor libre (sans collecteur) et qu'il est souvent retenu pour la motorisation des véhicules électriques modernes à cause de ces bonnes performances tels que : son rendement, couple de démarrage et couple de charge, qui sont meilleurs comparés aux machines à induction. De plus, on a récemment commencé à l'utiliser pour les grandes puissances ce qui le rend le moteur le plus convoité dans l'industrie automobile contemporaine. Le seul inconvénient de la machine à reluctance variable est l'ondulation du couple, qui est l'origine du bruit acoustique.

D'une manière générale, l'amplitude de ces ondulations est réduite par l'augmentation du nombre des dents statoriques et rotoriques, aussi que par l'augmentation de la surface des dents [48]. Toutefois, l'augmentation du nombre des dents ou leurs surfaces de superposition réduit le couple nominal de la machine et donc diminue les performances énergétiques de l'ensemble de traction [49].

Une autre approche pour la réduction des ondulations du couple est l'optimisation de la stratégie de commande pour profiter le plus possible des zones de production du couple et pour diminuer le couple parasite. Cette optimisation des instants de commutation des phases doit s'appuyer sur une très bonne analyse de commande.

Le présent travail consiste à la commande, régulation et simulation d'un MRV. Nous avons pu réaliser un modèle, avec un contrôle classique de vitesse capable de simuler et de répondre aux mieux aux exigences des consignes. Pour remédier aux problèmes des ondulations du couple et du bruit acoustique de la machine nous avons proposé dans la présente étude, la technique DTC pour le contrôle du MRV à 4 phases, 8/6 pôles. Le couple est contrôlé directement par la lecture flux et de la vitesse et pour le contrôle de vitesse nous avons choisi des régulateurs à logique floue.

Les performances de l'entraînement par la commande DTC et le régulateur de logique floue de la machine MRV sont analysées. Le couple et le flux sont maintenus dans leurs bandes respectives d'hystérésis. Nous avons remarqué que l'ondulation du couple est réduite de 30% comparée au couple nominal lors de l'accélération et lors d'un régime stationnaire. Nous pouvons conclure qu'avec le contrôle DTC le régulateur FLC les performances de la machine sont nettement améliorées.

Nous avons réparti notre travail sur trois chapitres. Dans le premier chapitre on a présentés les éléments de base de la chaîne de traction des VE en évoquant les différentes technologies utilisées. Le deuxième chapitre présente des notions de base des machines à reluctance variable, leur modélisation, leur principe de fonctionnement ainsi que leurs applications. Ont été mis en relief ces avantages ces inconvénients. Ensuite dans le troisième chapitre on a réalisé une commande avec un régulateur PI. Selon les résultats obtenus on a

Conclusion générale

remarqués une très importante ondulation du couple ce qui diminue les performances du MRV, par contre la vitesse mesurée suit bien la vitesse de référence. Afin d'améliorer les performances de la machine nous avons réalisés la deuxième partie qui se résume à l'emploi de la commande de DTC pour minimiser les ondulations du couple et l'emploi de la logique floue pour assurer le contrôle de la vitesse. Les résultats obtenus attestent bien que les ondulations du couple sont réduites nettement le compensateur de courant avec les régulateurs FLC réduit l'erreur de vitesse. Nous pouvons conclure qu'avec le contrôle DTC et le régulateur de logique floue, les performances de la machine ont été nettement améliorées.

En perspective, on compte améliorer notre étude avec une possibilité d'implémentation pratique en utilisant la carte D-Space.

REFERENCE

- [01] V. Mester, Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique, Thèse de doctorat, Ecole central de Lille, Mai 2007
- [02] F. Khoucha, A. Khoudiri, M. Benbouzid, A. Kheloui, Commande DTC d'une propulsion moteur Asynchrone / onduleur multi niveaux asymétrique pour un véhicule électrique, Européen Journal of Electrical Engineering 14, 2-3 (2011) 237-254.
- [03] H. Benariba, Contribution à la commande d'un véhicule électrique, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Décembre 2018.
- [04] D. Benoudjit, Contribution a l'optimisation et a la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique, Mémoire de magister, Université de Batna, Thèse de doctorat Janvier 2010.
- [05] http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=5871&from_espace_adherent=0.
- [06] A. Boucha, Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué, Mémoire De magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 2015.
- [07] S. Meziani, A. Bourenane, Contrôle par logique floue d'une chaîne de traction d'un véhicule Électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de master, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013.
- [08] C. Espanet. Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée Application au moteur-roue, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Janvier 1999.
- [09] G. Malloy, M. Lachapelle, Essence, hybride ou électrique : ce qu'il faut savoir, Association Canadienne des Automobilistes 2019.
- [10] <https://www.transbus.org>.
- [11] R. Castermans, G. Saelens, T. Bréchet Quelles sont les perspectives d'évolution des Microgrid en Belgique ? Étude des apports de l'économie collaborative au secteur de l'énergie 2018.
- [12] L. Angot, La mobilité électrique dans les systèmes de transport et de mobilité urbains : Constats et perspectives. Comment développer une nouvelle offre de mobilité durable par le biais de l'électromobilité dans la métropole toulousaine ? Géographie. 2014.
- [13] M. Florence, L. Benoit, Mobilité urbaine et technologies de l'information et de la communication (TIC) : enjeux et perspectives pour le climat, Studies, 5 :56, 2012.
- [14] A. Nouh, Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers, Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et par l'université de Franche-Comté, Mars 2008.

- [15] S. Zaouzaou, S. Meziani, Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un véhicule électrique , Mémoire de Master , Université Abderrahmane Mira de Bejaia , 2017.
- [16] S. Zaouzaou, S. Meziani, Etude et simulation des convertisseurs statiques existant dans un Véhicule électrique, Mémoire de Master , Université Abderrahmane Mira de Bejaia , 2017.
- [17] D. Sury, La voiture électrique : révolution ou fausse bonne idée ?, Mémoire de master, Université Libre de Bruxelles, 2011.
- [18] S. Butterbach, Stockage d'énergie électrique par association de batteries au plomb et de Supercondensateurs pour véhicule lourd, Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, septembre 2012.
- [19] W. Lajnef, Modélisation des supercondensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage Actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides, Thèse de doctorat, L'université Bordeaux 1, Décembre 2006.
- [20] D. Benoudjit, Contribution a l'optimisation et a la commande d'un système de propulsion Pour véhicule électrique, Mémoire de magister, Université de Batna, Thèse de doctorat, Janvier 2010.
- [21] A. Daanoune, Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Décembre 2012.
- [22] M. Ikkiss, R. El Ferrare, Voitures solaires électriques, Mémoire de Master, Faculté multydisciplinairede Ouarzazate, Mai 2013.
- [23] G. Henni, Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride, Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [24] CC Chan. The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE, 90(2) : 247–275, 2002.
- [25] P Andrada, M Torrent, B Blanqué, and JI Perat. Switched reluctance drives for electric vehicle applications. In International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2012.
- [26] Piotr Wach, " Dynamics and Control of Electrical Drives", ISBN 978-3-642-20221-6, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [27] REBAHI Fares, "Etude de l'Influence des Paramètres Géométriques et de Contrôle sur les Performances des MRV Cylindriques, Thèse de Doctorat, Université des Frères MENTOURI CONSTANTINE 2016
- [28] C.Keyes, Guide de référence sur l'efficacité énergétique des moteurs, CEA Technologies Inc. 2007.

- [29] 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.
- [30] D. Ilea, Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers, thèse de doctorat Ecole Centrale De Lille 2011.
- [31] S.Mouellef, Contribution A L'étude D'une Machine A Reluctance Variable: Conception, Modélisation & Simulation D'une MRVDS Université Mentouri De Constantine, 2008.
- [32] Jean Claude. Mouchoux, «Etude et réalisation de l'alimentation électronique d'un moteur à réluctance variable pour vheicule électrique expérimentation du moteur», Mémoire d'ingénieur CNAM, 18 Octobre. 1994.
- [33] Bernard. Multon, Conception et alimentation électronique des machines à réluctance variable à double saillance», Habilitation, INS Cachan, 17 Mai 1994.
- [35] BOUCHAREB ILHEM, Modélisation et Simulation de défauts d'une Machine Synchronne a Reluctance Variable, Mémoire de Magister, Université de Constantine 2009.
- [36] L. Moreau, « Modélisation, Conception et Commande de GRV « , Thèse Doctorat, Univ. Nantes, 9 Dec 2005.
- [37] ABID Mohammed, BEN AMOR Fathi, » ETUDE D'UNE GÉNÉRATRICE A RELUCTANCE VARIABLE », Mémoire de fin d'étude, univ. El Oued 2013/2014.
- [38] MOHAMED CHAKIR, Conception et Optimisation de la Performance d'une Génératrice à Reluctance Variable », Mémoire de Maitrise, Université Laval Québec 2010.
- [39] 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.
- [40] L.Takau and S. Round, Design Of A Switched Reluctance Motor For An Electric Vehicle, Department of Electrical and Computer Engineering University of Canterbury
- [41] L 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.
- [42] Y.Chen, H.Liu, X.Zhao, H.Zhang and Z.Zuo. Field-Circuit Coupled Analysis of an In Wheel Switched Reluctance Motor with Outer Rotor for EV Applications, Proc.2nd Intern. Conf. On Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, Atlantis Press, Paris, Pp 1689-1692, 2012.
- [43] T. Dinesh Kumar and A. Nagarajan, Design Of Switched Reluctance Motor For Elevator Application Journal of Asian Scientific Research, vol 3, N°3, pp 258-267, 2013.

- [45] A.El-wakeel, S.A. Gawish and M. A. L. Badr, Design of A Fault Tolerant Switched reluctance Motor For An Aircraft Fuel Pump application, Proc. Of the 8th ASATConference. 4-6 May 1999.
- [46] 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.
- [47] G. Landis, « Robotic Exploration of the Surface and Atmosphere of Venus, » Acta Astronautica, Vol. 59, 7, pp 517-580 Paper IAC-04-Q.2.A.08, (October 2006).
- [48] P.O. Rasmussen Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors », Dissertation Aalborg University 2002.
- [49] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 1999.
- [50] P. Borne, J. Rozinoer, J.-Y. Dieulot, and L. Dubois, Introduction à la commande floue: Ed. Technip, 1998.
- [51] C. Dualibe, M. Verleysen, and G. Jaspers, Design of Analog Fuzzy Logic Controllers in CMOS Technologies: Springer, 2003.
- [52] O. Castillo, J. Kacprzyk, P. Melin, W. Pedrycz, O.M. Ross, and R.S. Cruz, Theoretical advances and applications of fuzzy logic and soft computing vol. 42: Springer, 2007.
- [53] K.M. Passino, S. Yurkovich, and M. Reinfrank. "Fuzzy control," vol. 42: Addison Wesley, pp. 15-21, 1998.
- [54] B. Reusch and K.-H. Temme, Computational intelligence in theory and practice: Springer, 2001. [55] F. Valdés, "Design of a fuzzy logic software estimation process." Thèse de doctorat.Ecole de technologie supérieure. 2011.
- [56] Z Li. Fuzzy Chaotic Systems: Modeling, Control, and Applications (Studies in Fuzziness and Soft Computing): Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [57] M. Hanss, Applied fuzzy arithmetic: Springer, 2005.
- [58] E.P. Dadios, Fuzzy Logic-Emerging Technologies and Applications," 2012.
- [59] K. Ying-Shich, T. Tai-Wei, and S. Nan-Hui, "Design and implementation of a motion controller for XYZ table based on multiprocessor SoPC," in Control and Decision Conference, 2009, CCDC 09. Chinese, 2009, pp. 241-246.
- [60] M. Jothi, N.B. Balamurugan, and R. Harikumar, "Fuzzy processor based on VLSI - A review," in Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), 2013 International Multi-Conference on, 2013, pp. 216-222.

- [61] S. Singh and K.S. Rattan, "Implementation of a fuzzy logic controller on an FPGA using VHDL," in Fuzzy Information Processing Society, 2003. NAFIPS 2003. 22nd International Conference of the North American, 2003, pp. 110-115.
- [62] S.P.J. Vasantha Rani, P. Kanagasabapathy, and A. Sathish Kumar, "Digital Fuzzy Logic Controller using VHDL," in INDICON, 2005 Annual IEEE, 2005, pp. 463-466.
- [63] P.T. Vuong, A.M. Madni, and J.B. Vuong, "VHDL Implementation for a Fuzzy Logic Controller," in Automation Congress, 2006. WAC '06. World, 2006, pp. 1-8.
- [64] A. Abu-Khudhair, R. Muresan, and S.X. Yang. "FPGA based real-time adaptive fuzzy logic controller," in Automation and Logistics (ICAL), 2010 IEEE International Conference on. 2010, pp. 539-544.
- [65] S. SARRAY.' « Étude et simulation d'une commande directe de couple pour l'entraînement électrique d'une machine asynchrone ». Thèse de maîtrise en génie de la production automatisée M.ING doctorat Montréal/ décembre 2000.
- [66] A. CHEOK, Y. FUKUDA. « A new torque and flux control method for switched reluctance motor drives ». IEEE Transactions on Power Electronics, 2002.
- [67] BERNARD DE FORNEL, « Commande par control direct de couple des machines asynchrones ». Techniques d'ingénieurs, institut national polytechniques de Toulouse.
- [68] BOUCHARÉB. C, « Contrôle directe du couple des machines synchrones ».Thèse de magister, université de Batna, 2005.

ANNEXE

Annexe 0A

```
%% System Parameters
imax = 180;    % Maximum phase current      [A]
Rs    = 3;     % Stator resistance per phase [Ohm]
p     = 6;     % Number of rotor poles
Jm    = 0.2;   % Rotor inertia
      [Kg*m^2]
d     = 0.2;   % Damping coefficient
      [N*m/(rad/s)]
Vdc   = 220;   % DC voltage                  [V]

%% Control Parameters
Ts    = 1e-5;  % Fundamental sample time [s]
Tsc   = 10*Ts; % Control sample time     [s]

Kp    = 2.5;   % Proportional gain speed controller
Ki    = 100;  % Integrator gain speed controller
```

Annexe 0B

Fiche technique de la machine à réluctance variable étudiée

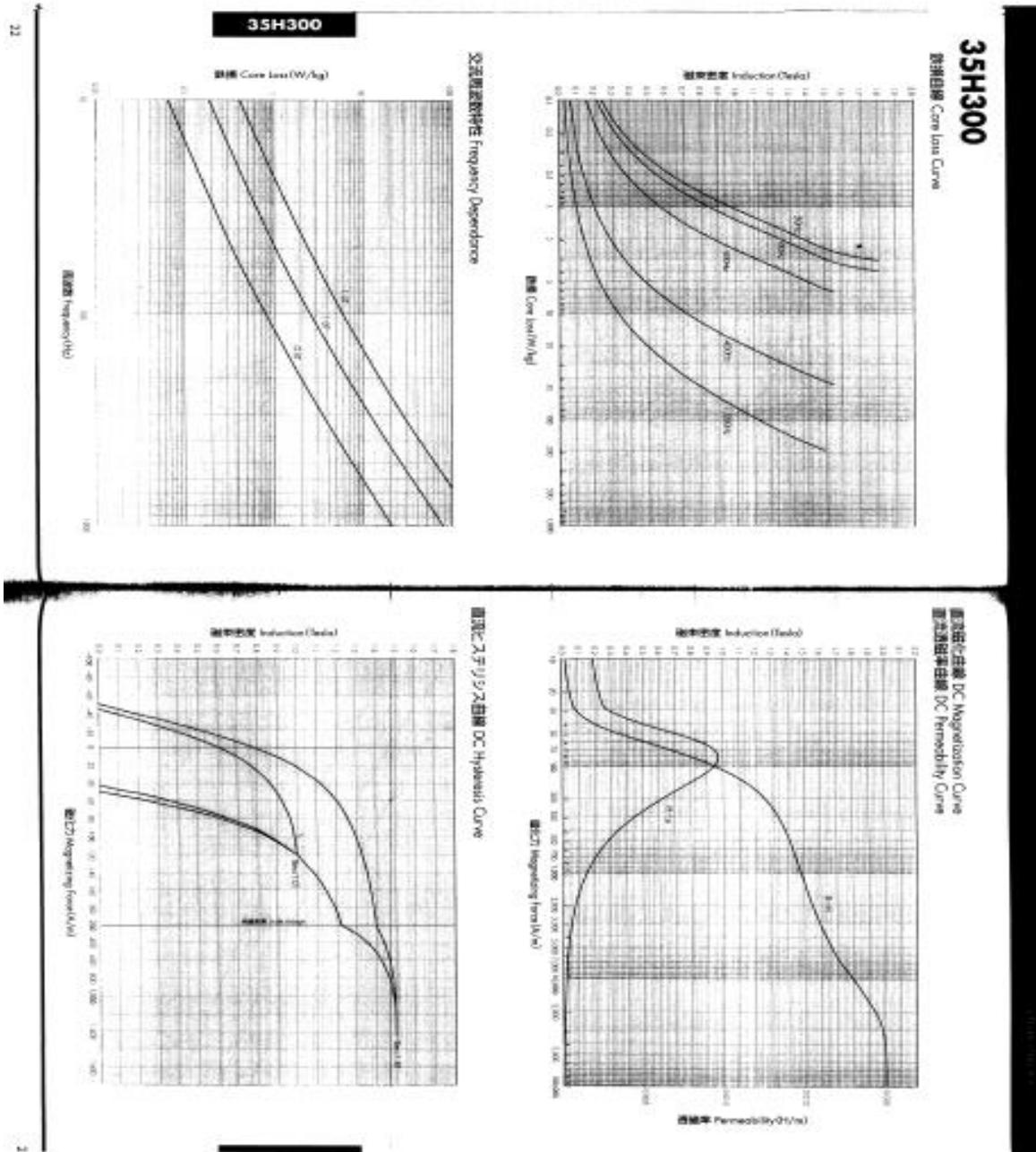
Paramètres physiques de la machine à réluctance variable

Référence : RA215LR-250V MS TECH

Paramètre	Valeur
Topologie	8S/6R
Nombre de phases	4
Nombre de dents au stator	8
Nombre de dents au rotor	6
Puissance nominale	8.3 kW
Vitesse nominale	6000 tr/min
Vitesse maximale	10 000 tr/min
Tension d'alimentation (DC)	250 V
Couple maximal	20 Nm
Courant maximal	61 A
Moment d'inertie	0.0043 Kg/m ²
Résistance de phase	0.0404 Ohm
Coefficient de frottement visqueux	0.005 Nm/s

Caractéristiques magnétiques des tôles

Référence de la tôle : 35H 300.



Fuzzy Logic Control With Electronic Switching For Switched Reluctance Motor (SRMES) for Traction of Light Electric Vehicles

Abdallah Chenouf¹, Houssem Gafsi¹, Sihem Ghoudelbourk², A. Rechach³

¹Electrical Department University Badji Mokhtar Annaba, Algeria

²Electrical Department University Badji Mokhtar Annaba, Algeria Mining Laboratory, Larbi Tebassi University, Tebessa, Algeria

³Mining institute, Mining Laboratory, Larbi Tebassi University, Tebessa, Algeria

Abstract. The field of electric traction has aroused great interest in recent years. A substantial improvement in the electromagnetic and energy performance of all electric traction systems must be made before electric vehicles can compete with vehicles equipped with internal combustion engines. The choice of the switched reluctance motor (SRM) as a light electric traction solution is justified by its very simple construction, high reliability, low construction price, and lightweight as well as the localized heating only in the stator favors the heat removal and reduces the need for additional cooling systems. The only downside to SRM is the torque ripples and the resulting acoustic effects. The control of this type of machine raises a certain number of constraints, among which we can cite: torque ripple and acoustic noise which are two of the main disadvantages of a switched reluctance motor. Intelligent technology regulators are proposed in this study for variable speed drive to reduce both the peak radial force and to decrease the effects of acoustic noise.

Keywords: Direct Torque Control, Switched Reluctance Motor, Electrical Vehicle, Fuzzy Logic.



PEOPLE'S DEMOCRATIC REPUBLIC OF ALGERIA
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
UNIVERSITY OF KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTY OF MATHEMATICS AND MATTER SCIENCES



N° : TAM129/2021

1st International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials
IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA (Virtual conference)

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

The organizing committee of the first International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials
IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA, certifies that:

Abdallah Chenouf

presented an Oral communication entitled:

Fuzzy Logic Control With Electronic Switching For Switched Reluctance Motor (SRMES) for Traction of Light Electric Vehicles

Co-author (s): Houssef Gafsi, Sihem Ghoudelbourk , A. Rechach

Dean of the Faculty
Pr. Djamel BECHKI

IC-SEAM'21
Co-organizer of IC-SEAM'21
Dr. Enchar BENMEBROUK
April 21-22, 2021

Chairman of the IC-SEAM'21
Dr. Farid MOHAMMEDI
April 21-22, 2021