



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa -

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie électrique



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

### Modélisation et commande d'un véhicule électrique par technique intelligente

Présenté par le binôme :

-SALMI Hadil  
-AYADA Malek

Présenté et soutenu publiquement, le 09/06/2022 devant le jury composé de :

Melle. Nehal Ouassila	MCB	Président
Mr. Soufi Youcef	Pr	Rapporteur
Mr. Moussa Mohamed Amine	MCA	Examineur

Promotion : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

*Louange à Allah le tout puissant qui m'a accordé la foi, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à remercier infiniment mon encadreur, Pr. Youcef SOUFI, pour son aide, sans réserve, sa patience et ses conseils précieux qui m'ont été très utiles.*

*Je remercie également les membres du jury qui m'ont honoré en acceptant de juger et d'enrichir ce travail.*

*Ces remerciements vont aussi à toute ma famille, et tous mes amis pour leur aide et leur soutien.*

*Je tiens à remercier également tous mes enseignants.*

*AYADA Malek  
SALMI Hadil*

# Dédicace

*Mon Père qui je déjà le perds, je sais que ton âme toujours avec moi comme je sais que tu seras aussi présent dans la salle le jour de la remise de mon diplôme, je souhaite que tu seras fière à moi*

*رحمك الله.*

*A ma très chère mère et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

*A ma chère sœur « Amira ».*

*A tous les membres de ma famille.*

*A tous mes amis*

*A mon amie est aussi binôme « Hadil »*

*Mes camarades de la promotion 2021-2022*

*A tous les personnes que j'aime.*

*Je dédie ce travail.*

*Malek*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements, et bien sûr pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.*

*A mes frères, mes soeurs et mes neveux ARYAM et SADEN.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A mon amie est aussi binôme « Malek »*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour un Master.*

*A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études.*

*Hadil*

# *SOMMAIRE*



## Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Notations et abréviations	i
Liste des figures	ii
Liste des Tableaux	iv
Introduction générale	1

## Chapitre 1

<b>I</b>	<b>Généralités sur le véhicule électrique</b>	
<b>I.1</b>	Introduction	3
<b>I.2</b>	Historique du Véhicule Electrique	3
<b>I.3</b>	Types des véhicules électriques (VE)	4
<b>I.3.1</b>	Véhicule tout électrique (VE)	4
<b>I.3.2</b>	Véhicule hybride (VH)	4
<b>I.4</b>	Chaine de traction et fonctionnement d'un véhicule électrique	5
<b>I.5</b>	Présentation des véhicules électriques et hybrides électriques	6
<b>I.5.1</b>	Classification du véhicule hybride	6
<b>I.5.1.1</b>	Hybride série	6
<b>I.5.1.2</b>	Hybride parallèle	7
<b>I.5.1.3</b>	Hybride combiné	8
<b>I.5.2</b>	Classification du véhicule tout électrique	9
<b>I.5.2.1</b>	La voiture hydrogène	9
<b>I.5.2.2</b>	Véhicule électrique à batterie rechargeable	10
<b>I.5.2.3</b>	Véhicule électrique à prolongateur d'autonomie ou Range Extender (REX)	11
<b>I.6</b>	Evaluation des moteurs de traction des véhicules électriques	11

<b>I.6.1</b>	Entrainement par moteur à courant continu	12
<b>I.6.2</b>	Entrainement par moteur à induction	13
<b>I.6.3</b>	Le moteur synchrone	14
<b>I.6.3.1</b>	Entrainement par moteur à réluctance variable	14
<b>I.6.3.2</b>	Entrainement par moteur synchrone à aimant permanent	15
<b>I.6.4</b>	Comparaison entre quatre types d'entraînement	16
<b>I.7</b>	L'électronique de puissance dans le véhicule électrique	16
<b>I.7.1</b>	Les redresseurs (AC/DC)	16
<b>I.7.2</b>	Les hacheurs (DC-DC)	16
<b>I.7.3</b>	Les onduleurs (DC-AC)	17
<b>I.7.4</b>	Le chargeur	17
<b>I.7.4.1</b>	Différents types de chargeurs	17
<b>I.7.4.2</b>	La recharge des voitures électriques	19
<b>I.7.4.3</b>	Modes de connexion des chargeurs pour véhicule électrique	20
<b>I.8</b>	Système de stockage de l'énergie dans les véhicules électriques	21
<b>I.8.1</b>	Batteries électrochimique	22
<b>I.8.2</b>	Super condensateurs	24
<b>I.8.3</b>	Piles à combustible	25
<b>I.9</b>	Avantages et inconvénient des véhicules électriques	26
<b>I.10</b>	Conclusion	27

## Chapitre 2

<b>II</b>	<b>Modélisation et commande linéaire du véhicule électrique étudié</b>	
<b>II.1</b>	Introduction	28
<b>II.2</b>	Modélisation du groupe motopulseur	28
<b>II.3</b>	Modélisation de la machine synchrone à aimants permanent	29
<b>II.3.1</b>	Description de la MSAP triphasée	29
<b>II.3.2</b>	Principe de fonctionnement de la MSAP	30

<b>II.3.3</b>	Modèle de la MSAP dans le repère triphasé ABC	30
<b>II.3.3.1</b>	Equations électriques	31
<b>II.3.3.2</b>	Equations magnétiques	31
<b>II.3.4</b>	Modèle diphasé	32
<b>II.3.5</b>	La transformation de Park	33
<b>II.3.5.1</b>	Principe de transformation de Park	33
<b>II.3.6</b>	Equations mécaniques	35
<b>II.4</b>	La commande vectorielle de la MSAP	36
<b>II.4.1</b>	Principe de la commande vectorielle	36
<b>II.4.2</b>	Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension	37
<b>II.4.2.1</b>	Description du système global	37
<b>II.5</b>	Découplage	38
<b>II.5.1</b>	Découplage par compensation	39
<b>II.6</b>	Synthèse des régulateurs	41
<b>II.6.1</b>	Calcul des régulateurs	41
<b>II.6.1.1</b>	Régulateur de courant $I_d$	42
<b>II.6.1.2</b>	Régulateur de courant $I_q$	43
<b>II.6.1.3</b>	Régulateur de la vitesse	43
<b>II.7</b>	Modélisation de convertisseur statique	44
<b>II.7.1</b>	Modélisation de l'onduleur de tension	44
<b>II.7.1.1</b>	Classification des onduleurs	45
<b>II.7.1.1.a</b>	Onduleur autonome	45
<b>II.7.1.1.a</b>	Onduleur non autonome	45
<b>II.7.2</b>	Onduleur de tension	45
<b>II.8</b>	Onduleur de Tension à MLI	47
<b>II.8.1</b>	MLI Sinus-Triangle	47
<b>II.8.2</b>	MLI Vectorielle	48
<b>II.9</b>	Dynamique de véhicule	50
<b>II.9.1</b>	Description du modèle	50
<b>II.9.2</b>	Le modèle dynamique du véhicule	51
<b>II.9.2.1</b>	Force de roulement	51

<b>II.9.2.2</b>	Force aérodynamique	52
<b>II.9.2.3</b>	Force de gravité	52
<b>II.9.2.4</b>	Force de freinage	52
<b>II.9.2.5</b>	Force d'accélération	52
<b>II.10</b>	Conclusion	53

## Chapitre 3

<b>III</b>	<b>Commande non linéaire du véhicule électrique</b>	
<b>III.1</b>	Introduction	54
<b>III.2</b>	Historique et Principe de la logique floue	54
<b>III.2.1</b>	Ensembles flous et variables linguistiques	55
<b>III.2.2</b>	Déférentes formes pour les fonctions d'appartenance	56
<b>III.2.3</b>	Opérateur de la logique floue	56
<b>III.2.4</b>	Commande par logique floue	57
<b>III.2.4.1</b>	Structure générale d'un contrôleur flou	58
<b>III.2.4.1.1</b>	L'interface de fuzzification	58
<b>III.2.4.1.2</b>	La base de connaissance	59
<b>III.2.4.1.3</b>	Bloc inférence	59
<b>III.2.4.1.4</b>	Défuzzification	59
<b>III.2.4.2</b>	Défferentes approches pour la détermination des règles	60
<b>III.3</b>	Comparaison avec la logique classique	62
<b>III.4</b>	Avantages et inconvénients de la commande par logique flou	62
<b>III.5</b>	Application du régulateur flou pour la commande de la MSAP	63
<b>III.5.1</b>	Le choix des variables d'entrée et de sortie	63
<b>III.5.2</b>	Normalisation des variables d'entrées et de sortie	63
<b>III.5.3</b>	Interface de fuzzification	63
<b>III.5.4</b>	Choix de la méthode d'inférence	64
<b>III.5.5</b>	Base de connaissances	64
<b>III.5.6</b>	Choix de la méthode de défuzzification	64
<b>III.6</b>	Réglage de la vitesse	66
<b>III.7</b>	Conclusion	66

**Chapitre 4****IV****Simulation, validation et interprétations des résultats**

<b>IV.1</b>	Introduction	67
<b>IV.2</b>	Schéma globale de simulation	67
<b>IV.3</b>	Résultats de simulations	68
<b>IV.3.1</b>	Résultats de simulation avec un régulateur PI	68
<b>IV.3.2</b>	Interprétation des résultats	70
<b>IV.3.3</b>	Simulation avec un régulateur logique Flou	71
<b>IV.3.4</b>	Interprétation des résultats	73
<b>IV.4</b>	Etude comparative des deux méthodes	74
<b>IV.5</b>	Conclusion	74

**Conclusion générale****Bibliographie**

## *Notations et Abréviations*

<i>VE</i>	: Véhicule <i>E</i> lectrique
<i>VHE</i>	: Véhicule <i>H</i> ybride <i>E</i> lectrique
<i>VEB</i>	: Véhicule <i>E</i> lectrique à <i>B</i> atterie
<i>REX</i>	: <i>R</i> ange <i>E</i> xtender
<i>MCC</i>	: <i>M</i> oteur à <i>C</i> ourant <i>C</i> ontinu
<i>MI</i>	: <i>M</i> oteur à <i>I</i> nduction
<i>MRV</i>	: <i>M</i> oteur a <i>R</i> éductance <i>V</i> ariable
<i>MSAP</i>	: <i>M</i> oteur <i>S</i> ynchrone à <i>A</i> imant <i>P</i> ermanent
<i>PAC</i>	: <i>P</i> ile à <i>C</i> ombustible
<i>VPC</i>	: Véhicule <i>P</i> ile <i>C</i> ombustible
<i>FMM</i>	: <i>F</i> orce <i>M</i> agnétomotrice
$(d,q)$	: Indice du repère de Park lié au rotor
$(\alpha,\beta)$	: Indice du repère de Concordia lié au rotor
<i>RLF</i>	: <i>R</i> égulateur par <i>L</i> ogique <i>F</i> lou



## Liste des figures

Figure	Titre	Page
<b>Chapitre 1</b>		
Figure. I.1	: Les véhicules électrique et hybride	4
Figure. I.2	: Structure de la chaine de traction	6
Figure. I.3	: Architecture Hybride Série	7
Figure. I.4	: Architecture Hybride Parallèle	8
Figure. I.5	: Architecture Hybride Combiné	9
Figure. I.6	: Architecture voiture à hydrogène	10
Figure. I.7	: Véhicule électrique à batterie rechargeable	11
Figure. I.8	: Exemple de chargeur externe au VE - intégré à la borne de recharge	18
Figure. I.9	: Exemple de chargeur embarqué à bord du VE et intégré à la chaîne de traction	19
Figure. I.10	: La Wallbox pour la recharge des VE	21
Figure. I.11	: Borne de recharge publique	21
Figure. I.12	: Super condensateurs (a) et son schéma équivalent (b)	24
Figure. I.13	: véhicule électrique à pile à combustible	25
<b>Chapitre 2</b>		
Figure. II.1	: Composants d'un entrainement électrique à base de la MSAP	28
Figure. II.2	: Modèle de la machine synchrone dans le repère triphasé	30
Figure. II.3	: Représentation des différents repères	32
Figure. II.4	: Représentation de la transformation de Park	33
Figure. II.5	: Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP	37
Figure. II.6	: Description des couplages	39
Figure. II.7	: Description de la compensation	40
Figure. II.8	: Principe de découplage par compensation	40
Figure. II.9	: Commande découplée	40
Figure. II.10	: Boucle de régulation du courant $I_d$	42
Figure. II.11	: Boucle de régulation du courant $I_q$	43
Figure. II.12	: Boucle de régulation de vitesse	44
Figure. II.13	: Schéma d'un onduleur de tension	45
Figure. II.14	: Description de la commande M.L.I. sinus – triangle	48
Figure. II.15	: Représentation des vecteurs, de tensions dans le repère $(\alpha, \square)$	50

<b>Figure. II.16</b>	: Les forces agissant sur un véhicule	50
<b>Figure. II.17</b>	: La force de roulement sur la roue	51
<b>Chapitre 3</b>		
<b>Figure. III.1</b>	: Différentes formes des fonctions d'appartenance	56
<b>Figure. III.2</b>	: Exemple d'opérations sur des ensembles flous	57
<b>Figure. III.3</b>	: Structure de base du régulateur	58
<b>Figure. III.4</b>	: Ecriture de jeu de règles à l'aide d'une analyse temporelle	61
<b>Figure. III.5</b>	: Fonctions d'appartenance utilisées dans la fuzzification	65
<b>Figure. III.6</b>	: Fonctions d'appartenance utilisées dans la défuzzification	65
<b>Figure. III.7</b>	: Structure globale du réglage de vitesse par la logique floue de la MSAP	66
<b>Chapitre 4</b>		
<b>Figure. IV.1</b>	: Modèle complet de la simulation	67
<b>Figure. IV.2</b>	: Allure des courants $I_d, I_q$	68
<b>Figure. IV.3</b>	: Couple électromagnétique de la MSAP avec un régulateur PI	68
<b>Figure. IV.4</b>	: vitesse de rotation de la MSAP	69
<b>Figure. IV.5</b>	: Allure de l'erreur	69
<b>Figure. IV.6</b>	: Les courants statoriques $I_{sabc}$	69
<b>Figure. IV.7</b>	: Tensions $U_{abc}$ à la sortie de l'onduleur	70
<b>Figure. IV.8</b>	: Allure des courants $I_d, I_q$ .	71
<b>Figure. IV.9</b>	: Couple électromagnétique de la MSAP avec un régulateur flou	71
<b>Figure. IV.10</b>	: Vitesse de référence et de rotation de la MSAP	72
<b>Figure. IV.11</b>	: Allure de l'erreur	72
<b>Figure. IV.12</b>	: Les courants statoriques $I_{sabc}$	72
<b>Figure. IV.13</b>	: Allure des tensions $U_{abc}$	73

## Liste des Tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre 1</b>		
<b>I.1</b>	: Avantages et inconvénients des moteurs utilisés dans les VE	16
<b>I.2</b>	: Durées et puissances de recharge pour une batterie 22 kWh	18
<b>I.3</b>	: Comparaison des différents types des batteries	23
<b>Chapitre 2</b>		
<b>II.1</b>	: Tensions simples, et biphasées	49
<b>Chapitre 3</b>		
<b>III.1</b>	: Règles d'inférences.	64

*INTRODUCTION*

*INTRODUCTION*

*GENERALE*

*GENERALE*

## **Introduction Générale**

Aujourd'hui, La plupart des voitures dans le monde sont propulsées par un moteur à combustion interne à énergie conventionnelle polluant l'atmosphère par des particules de dioxyde de carbone, nuisant à la santé humaine et à l'environnement. Il est donc primordial de chercher des sources d'énergie propres, durables et vertes surtout avec la pénurie et la pollution des énergies fossile. Dans ce contexte, la recherche et le développement de nouveaux véhicules à traction hybride ou à énergie électrique est très important et d'actualité. L'utilisation du véhicule électrique est considérée comme l'une des solutions préconisées par les constructeurs ou son devenir dans les prochaines années est un sujet de recherche d'actualité toute en cherchant toujours, une meilleure qualité de vie, un environnement propre, une économie de l'énergie et en atténuant le réchauffement climatique de la planète qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique.

Entraîner des charges à vitesse variable, tout en contrôlant la vitesse ou le couple, est devenu incontournable dans les industries modernes. Les systèmes de traction, de levage, de propulsion, les applications et les besoins sont innombrables et variés, de même que les solutions techniques. Toutefois, depuis une vingtaine d'années, les entraînements par moteurs électriques connaissent un essor important. Ceci est dû en grande partie aux systèmes de commandes modernes, associant aux moteurs électriques des convertisseurs statiques et des commandes analogiques ou numériques performantes. On obtient ainsi des systèmes couvrant toutes les gammes de puissances, très souples d'emploi, sûrs et fiables.

La commande à vitesse variable des entraînements électriques a bénéficié, ces dernières années, d'avancées méthodologiques et technologiques significatives. En effet, Le développement rapide dans la technologie, de l'électronique de puissance et des lois de commande ont permis aujourd'hui de mettre en œuvre des algorithmes très complexes avec un temps de calcul trop long et au moteur synchrone à aimants permanents de remplacer le moteur asynchrone et le moteur à courant continu dans de nombreuses applications industrielles. Cependant, les non linéarités et les incertitudes internes et externes de la MSAP représentent de sérieux obstacles pour le contrôle en vitesse d'une MSAP.

L'objectif de notre travail constitue une contribution à l'amélioration des performances d'un système d'entraînement électrique à vitesse variable (véhicule électrique) basé sur l'utilisation de la MSAP alimentée par un onduleur de tension triphasé et l'étude par simulation de son comportement en terme de commande et contrôle à vitesse variable en introduisant

des régulateurs de types classique et par un régulateur basé sur l'utilisation de la logique floue pour le réglage de la vitesse.

Pour ce faire et pour l'établissement de cette étude, outre une introduction générale et une conclusion générale, le contenu de ce mémoire est réparti en quatre chapitres :

Le premier chapitre est réservé à la présentation en générales des différents types de véhicules électriques, leur conception et les principaux composants de la chaine de traction toute en donnant à la fin de ce chapitre les différents avantages et inconvénients des véhicules électriques.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine considérée et des sous-systèmes composant le véhicule électrique : le moteur synchrone a aimant permanent, le convertisseur statique, au principe de la commande vectorielle et à la régulation de la vitesse en utilisant un régulateur classique PI.

Le troisième chapitre décrit d'une manière générale les notions de base de la logique floue liées aux techniques de commande et l'application de la logique floue pour une régulation de vitesse de la MSAP en utilisant des régulateurs flous de type Mamdani.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation des résultats obtenues issues de la simulation du système considéré sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les performances et la robustesse de la stratégie de contrôle intelligente proposée sont présentés et les résultats obtenus montrent l'efficacité et la faisabilité du contrôleur développé.

A la fin de ce travail, une conclusion générale est donnée avec des perspectives à envisager pour la continuation du présent travail

# CHAPITRE I

*Généralités sur le véhicule électrique*

## I.1. Introduction

Les véhicules conventionnels utilisent le pétrole comme une source d'énergie, et qui représentent la majorité des véhicules existants aujourd'hui, polluant l'atmosphère par des particules de dioxyde de carbone, nuisant à la santé humaine et à l'environnement. Il est donc primordial d'utiliser des sources d'énergie propres, durables et vertes.

Pour parvenir à une mobilité plus propre et plus verte dans les villes très peuplées du monde, l'utilisation des véhicules électriques et hybrides doit être considérée comme l'une des solutions. Cette solution possible dite "zéro émission" est basée sur une chaîne de traction composée d'un moteur électrique et une source d'énergie (batterie) [1] [2] [3].

Dans ce chapitre, des généralités ainsi que les différents types de véhicules électriques, leur conception et les principaux composants de la chaîne de traction sont présentés tout en donnant les différents avantages et inconvénients des véhicules électriques à la fin de ce chapitre.

## I.2. Historique du Véhicule Electrique

Les véhicules électriques sont apparus pour la première fois au milieu du XIXe siècle. Un véhicule électrique a tenu le record de vitesse des véhicules jusqu'à environ 1900. Le coût élevé, la vitesse maximale et la faible portée des véhicules électriques à batterie, par rapport aux véhicules à moteur à combustion interne ultérieurs, ont entraîné une baisse mondiale de leur utilisation ; bien que les véhicules électriques aient continué d'être utilisés sous la forme de trains électriques et d'utilisations de niche.

Au début du XXIe siècle, l'intérêt pour les véhicules électriques et autres véhicules à carburant de remplacement a augmenté en raison de l'inquiétude croissante concernant les problèmes liés aux véhicules à hydrocarbures, y compris les dommages causés à l'environnement par leurs émissions et la durabilité de l'hydrocarbure actuel, l'infrastructure de transport basée ainsi que l'amélioration de la technologie des véhicules électriques. Depuis 2010, les ventes combinées de voitures tout-électriques et de fourgonnettes ont atteint 1 million d'unités dans le monde en septembre 2016 [4].

En 2017, Tesla annonce Model X avec batteries sont composées de milliers de cellules lithium-ion de type 18650 fournies par Panasonic, et Renault Zoe utilisée un nouveau moteur produit en interne avec nouvelle batterie, elle passe de 22 à 41 kWh.

En 2018, la voiture électrique la plus vendue a été la Tesla Model 3 avec 7% de l'ensemble des voitures électriques et hybrides rechargeables vendues dans l'année



suivie par la chinoise BAIC EC-Séries et la Nissan Leaf (4 % des ventes chacune) ; avec les Tesla Model S et Model X placées en quatrième et cinquième positions, Tesla totalise 12% de part de marché. Sur les vingt modèles les plus vendus, onze sont chinois ; les constructeurs européens sont peu présents : la Renault ZOE, BMW occupe les 12e et 18e places avec la version hybride rechargeable de la Série 5 et la BMW i347 [1].

### I.3. Types des véhicules électriques

#### I.3.1. Véhicule tout électrique (VE)

Une voiture électrique est une automobile mue par un ou plusieurs électriques, généralement alimentés par une batterie d'accumulateurs voire une pile à hydrogène.

#### I.3.2. Véhicule hybride (VH)

Une voiture hybride utilise deux types de motorisation : une motorisation thermique et une motorisation électrique [5].

Ce type de véhicule est équipé :

- D'un moteur thermique (qui le plus souvent est un moteur diesel ou essence).
- D'un, ou de plusieurs, moteur(s) électrique(s).
- D'une batterie de traction.



**Fig. I.1.** Les véhicules électrique et hybride

## I.4. Chaîne de traction et fonctionnement d'un véhicule électrique

La solution la plus simple pour réaliser un véhicule électrique est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique.

L'élément central des véhicules électriques qui les distingue des véhicules classiques est la chaîne de traction électrique qui utilise les accumulateurs pour le stockage d'énergie électrique, un moteur pour convertir l'énergie électrique embarquée en énergie mécanique (c'est à dire en un couple avec une vitesse de rotation spécifique) et un convertisseur électrique (onduleur) qui permet de transformer le courant continu délivré par les accumulateurs en courant alternatif afin d'alimenter le moteur. Ces convertisseurs font appel à des structures d'électronique de puissance complexes, utilisées en particulier dans le contrôle de la variation de vitesse des moteurs [3].

La version de base d'une transmission électrique comprend la 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.

Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse. Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnée, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé [6].

Ce processus peut être inversé et le moteur électrique peut servir de frein électrique. Le moteur électrique fonctionne alors comme un générateur et transforme l'énergie de freinage en énergie électrique qui est stockée dans la batterie via l'onduleur. Ce processus est appelé récupération. Pour le système électrique sans propulsion, une branche haute tension et une branche basse tension peuvent être distinguées. Les auxiliaires de chauffage et de refroidissement sont connectés à la branche haute tension. La branche basse tension est alimentée par un convertisseur DC /DC. Il assure une charge suffisante de la batterie 12 V ainsi que l'alimentation en énergie de tous les auxiliaires 12 V tels que l'éclairage, la radio et la navigation [5].

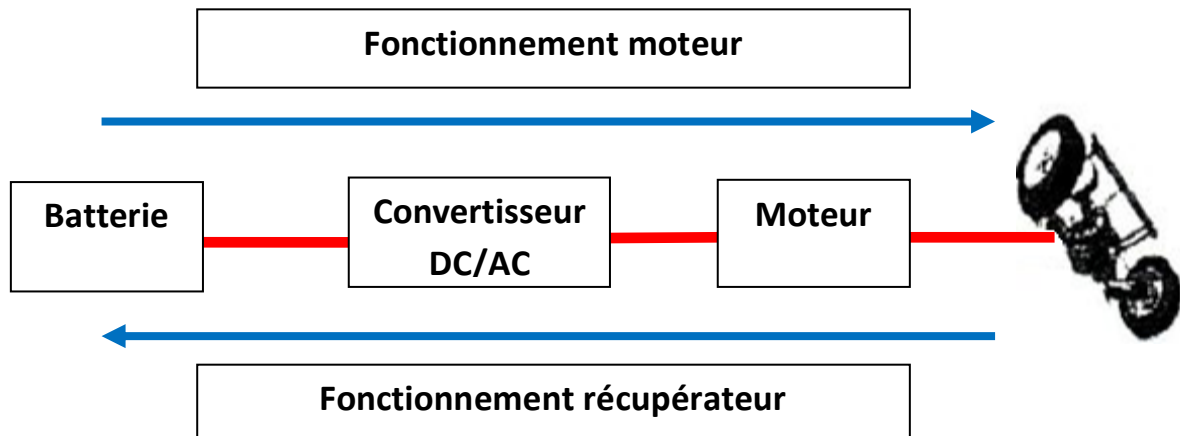


Fig. I.2. Structure de la chaîne de traction

## I.5. Présentation des véhicules électriques et hybrides électriques

### I.5.1. Classification du véhicule hybride

L'architecture de la chaîne de traction d'un véhicule hybride est plus complexe que celle des véhicules conventionnels. Trois familles d'architectures sont disponibles pour la motorisation hybride : série, parallèle et combinée.

#### I.5.1.1. Hybride série

Cette architecture hybride est celle dont la conception est la plus simple. Dans l'architecture série, la propulsion est intégralement assurée par un moteur électrique. Le moteur thermique est mécaniquement découplé des roues et directement lié à une génératrice électrique via une jonction mécanique qui assure la charge de la batterie [7].

La Figure I.3 schématise le fonctionnement d'un véhicule hybride série. Le moteur électrique est alimenté soit par des batteries, soit par une génératrice entraînée par le moteur thermique, soit par un mélange des deux. Cette configuration permet à la batterie d'être rechargée soit :

- Par le moteur thermique, via la génératrice. Dans ce cas, le moteur thermique est contrôlé de manière à fonctionner à son rendement optimum.
- Par le moteur électrique, qui sera alors utilisé en mode générateur, lors d'un freinage récupératif. L'intérêt de cette architecture réside dans la capacité à pouvoir faire fonctionner le moteur thermique au point de fonctionnement souhaité, quelles que soient les conditions extérieures telles que la vitesse du véhicule ou la demande de couple, puisque le moteur thermique est complètement déconnecté du train moteur. En revanche, l'énergie mécanique produite par le moteur thermique est ensuite transformée en énergie électrique via la génératrice, puis à nouveau transformée en énergie mécanique par le moteur électrique. Ainsi, la cascade

de rendement du train moteur est assez défavorable à la réduction de l'énergie consommée, c'est pour cette raison que les véhicules hybrides série dépassent rarement le stade du prototype [8].

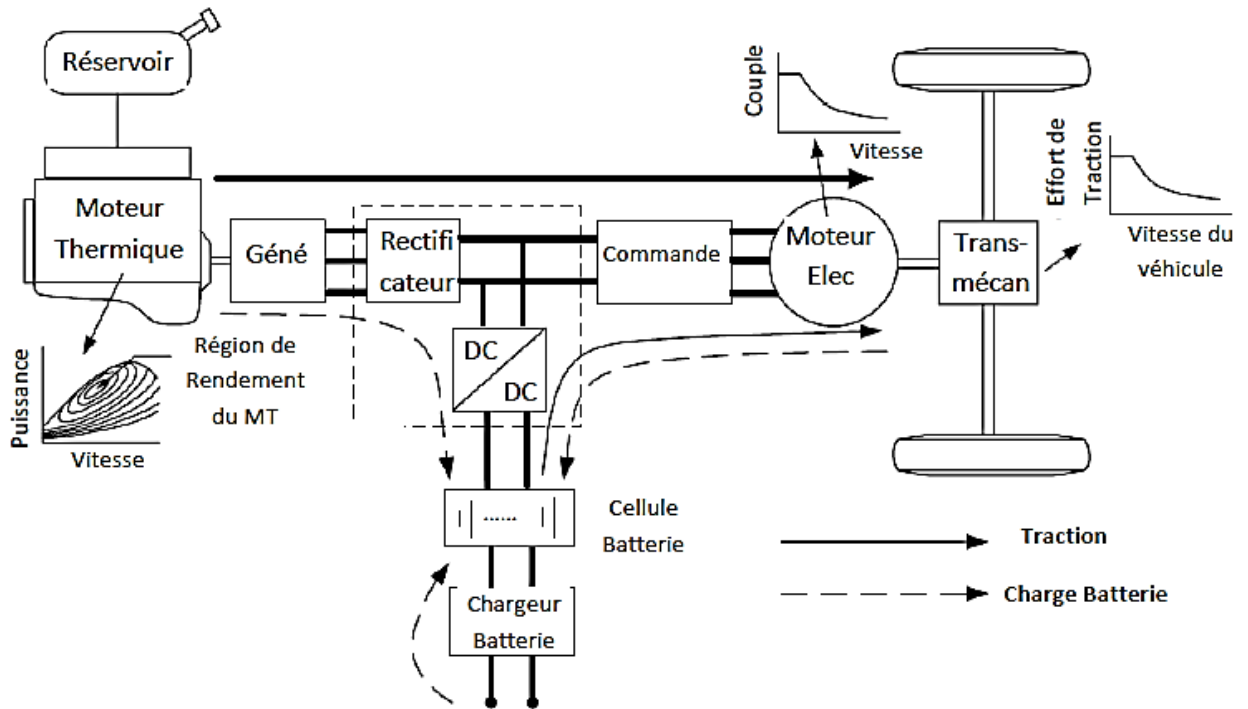


Fig. I.3. Architecture Hybride Série

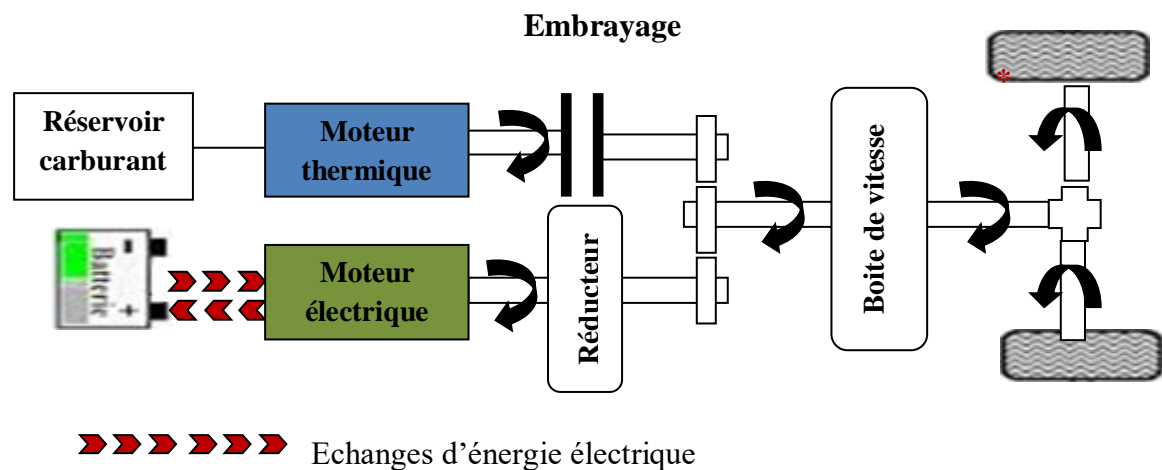
### I.5.1.2. Hybride parallèle

Dans une structure hybride parallèle, les sources d'énergie primaire (le réservoir de carburant) et secondaire (la batterie), sont liées directement et séparément aux deux moteurs du véhicule. Les deux moteurs peuvent participer d'une façon parallèle au déplacement du véhicule, en transmettant chacun une puissance mécanique aux roues.

La Figure I.4 représente le schéma de principe de l'architecture parallèle, ainsi que les transferts d'énergie possibles entre les différents organes.

- 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
- 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 [2].
- Lorsque le moteur électrique a une très faible puissance, on parle alors d'alternodémarrreur et celui-ci est placé avant l'embrayage. Dans ce cas, la propulsion est

quasi intégralement assurée par le moteur thermique et l'alternateur-démarrateur n'est utilisé que dans la phase de démarrage du moteur thermique. Le moteur thermique est arrêté dès que le véhicule est arrêté afin de réduire la consommation et les émissions de polluants. Lors des phases de démarrage, le moteur thermique pouvant être entraîné à régime beaucoup plus élevé qu'avec un démarreur classique, les émissions de polluants sont réduites de manière significative [7].



**Fig. I.4.** Architecture Hybride Parallèle

### I.5.1.3. Hybride combiné

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle, dont la Toyota Prius fait partie. Cette dernière combine les modes de fonctionnement et les avantages des deux architectures série et parallèle.

Cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice, et un moteur thermique, mais comprenant une liaison mécanique additionnelle (du moteur thermique vers les roues) par rapport à l'architecture série et un générateur additionnel par rapport à l'architecture parallèle.

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. Schématise le fonctionnement d'un hybride combiné [2].

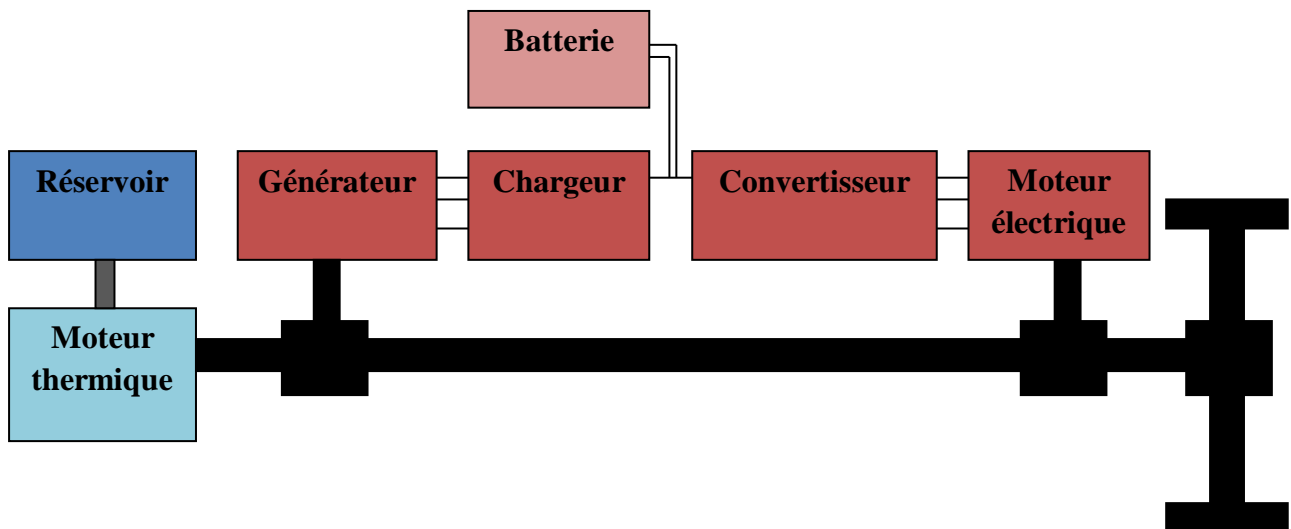


Fig. I.5. Architecture Hybride Combiné

## I.5.2. Classification du véhicule tout électrique

Sur une voiture électrique, pas de réservoir à carburant ni de moteur à combustion mais un moteur électrique piloté par un contrôleur électronique et associé à une batterie. Plus ou moins grande, celle-ci permet de parcourir de 120 à plusieurs centaines de kilomètres selon les modèles et se recharge directement sur le réseau électrique, chez soi ou sur une borne de recharge publique.

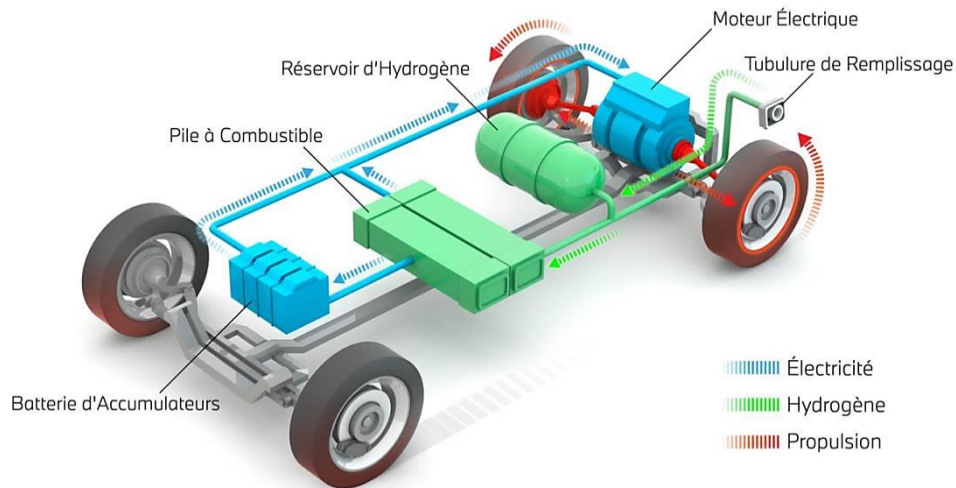
En termes de conception, la voiture électrique est beaucoup plus simple qu'une voiture thermique ou hybride. Résultats : un coût d'entretien réduit et une énergie beaucoup moins chère que les carburants traditionnels. A cela s'ajoutent un fonctionnement 100% silencieux, une conduite agréable et des émissions de CO<sub>2</sub> nulles à l'usage.

### I.5.2.1. La voiture hydrogène

Au menu des technologies vers lesquelles se tourne le futur de l'automobile, la voiture à pile à combustible hydrogène est d'ores et déjà une réalité. Cette technologie équipe, pour la première fois, un véhicule de la gamme utilitaire Renault en 2014, Kangoo Z.E. Hydrogène.

Le terme « voiture électrique à hydrogène » désigne un véhicule alimenté par une source d'énergie particulière, l'hydrogène, et ce grâce à un système particulier : la pile à combustible. La voiture à « pile à combustible à hydrogène » fait partie de la grande famille des voitures électriques. Sa traction est, en effet, assurée par un groupe motopropulseur électrique. Dans le cas d'un véhicule électrique à batterie lithium-ion, l'énergie électrique est « simplement » stockée dans la batterie grâce à chaque recharge sur le réseau électrique. C'est là que réside la différence avec le véhicule à hydrogène. L'électricité nécessaire au

fonctionnement du groupe motopropulseur y est apportée par la batterie, mais aussi par la pile à combustible, à partir de l'hydrogène stocké à bord. La plupart des véhicules à hydrogène proposés actuellement par les constructeurs automobiles reposent sur ce principe [9].



**Fig.I.6.** Architecture voiture à hydrogène [X]

Il faut considérer l'hydrogène, non comme un carburant de la voiture, mais comme un stockage de l'électricité. De ce fait, l'autonomie et le temps de charge de la voiture à hydrogène, sont sensiblement identiques à ceux d'une voiture classique. Exemple Toyota, Honda, Hyundai, Daimler ou Mercedes construisent déjà en série des voitures qui roulent à l'hydrogène. Et plus nous serons nombreux à rouler à l'hydrogène, plus rapide sera la construction du réseau de distribution d'hydrogène [3].

### I.5.2.2. Véhicule électrique à batterie rechargeable

Les VEBs utilisent pour seule énergie motrice l'électricité stockée dans une batterie de grande capacité rechargeable sur le réseau électrique [2]. Sa capacité est exprimée en kilowattheure (kWh). Il s'agit du composant le plus coûteux et le plus sensible d'un véhicule électrique. Aussi appelée « pile », « accumulateur », ou « pack », Le temps de recharge d'un VEB est fonction de la taille de la batterie et du recours ou non à une borne de recharge rapide. De plus, le temps de recharge varie en fonction des paramètres tels que la température ambiante et l'autonomie résiduelle de la batterie au moment du branchement [3].





**Fig. I.7.** Véhicule électrique à batterie rechargeable

### **I.5.2.3. Véhicule électrique à prolongateur d'autonomie ou Range Extender (REX)**

Certains constructeurs automobiles ont prévu en option le prolongateur d'autonomie. Il peut être proposé sous deux formes :

- Un moteur additionnel thermique
- Un moteur électrique à tracter

Le moteur additionnel s'agit d'un petit moteur qui fonctionne au carburant, installé près du moteur électrique. Contrairement à une voiture hybride, la voiture électrique équipée de ce genre de prolongateur d'autonomie ne va pas être propulsée par ce petit moteur en cas de panne sèche d'énergie électrique. Le moteur à essence ne va servir que pour aider la batterie à se recharger. L'autre forme de REX est la remorque intégrant une batterie.

Sans perturber l'environnement et le réseau, cette technologie a pour but d'améliorer l'autonomie de la voiture électrique. Il est possible, grâce à ce système, de gagner une centaine de kilomètres, sans recourir à une recharge [10].

## **I.6. Evaluation des moteurs de traction des véhicules électriques**

Dans un véhicule électrique, c'est la batterie qui fournit au moteur toute l'énergie nécessaire. Celui-ci va ensuite transformer cette énergie électrique en énergie mécanique qui pourra faire avancer la voiture. Le moteur électrique est divisé en deux parties : un stator (partie fixe) et un **rotor** (partie mobile). Le stator est placé autour du rotor. Il est composé de deux paires d'aimants, chacune comportant deux bobines de fils électriques (généralement en cuivre) disposées à chaque pôle opposé de l'aimant. Lorsque le stator est traversé par un courant électrique, il génère un champ magnétique qui entraîne la rotation du rotor [11].



Il existe deux façons pour l'électricité de circuler dans un conducteur. Le courant alternatif (AC) désigne un courant électrique dans lequel les électrons changent périodiquement de direction. Le courant continu (DC), comme son nom l'indique, circule dans une seule direction.

Les batteries de voitures électriques fonctionnent avec du courant continu. Pour ce qui est du moteur principal du véhicule électrique (qui assure la traction du véhicule), ce courant continu doit toutefois être transformé en courant alternatif par l'intermédiaire d'un onduleur.

C'est grâce à cette rotation que le moteur se met en marche. Jusqu'à présent, quatre types de motorisation ont été appliqués aux VE. Il s'agit des entraînements à moteur à courant continu (MCC), des entraînements à moteur à induction (MI), des entraînements à moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) et des entraînements à moteur à réluctance variable (MRV).

### **I.6.1. Entraînement par moteur à courant continu**

Les premiers moteurs électriques à être utilisés sur les véhicules électriques furent les moteurs à courant continu (DC motor). Ce choix était logique il y a 30 ans, car c'était le moteur le plus facile à piloter en vitesse.

Néanmoins, l'utilisation de ce type de moteur électrique pose plusieurs problèmes :

- Rendement limité (90%).
- Vitesse de rotation élevée.
- Pertes thermiques situées au rotor, donc difficiles à évacuer (l'échauffement fait encore plus diminuer le rendement).
- Usure des balais.

Le moteur à courant continu se compose d'un stator (inducteur), d'un rotor (induit), de balais (aussi appelés charbons) et d'un collecteur. Lorsque le moteur est alimenté, le champ magnétique généré permet de le faire tourner (sens déterminé par celui du courant). La vitesse de rotation est directement liée à certains paramètres tels que le nombre de tours du bobinage (composante du rotor), sa superficie, le courant passant dans la bobine et la force du courant magnétique [12].

L'avantage d'un moteur à courant continu est qu'il ne nécessite pas d'électronique pour être piloté. Il peut être directement branché sur une alimentation électrique, avec ou sans variateur de vitesse. Il a aussi une forte capacité à entraîner des charges élevées.

Le moteur à courant continu souffre principalement d'un entretien délicat au niveau du collecteur (pièce fragile et coûteuse). Quant aux balais, ils doivent être changés

régulièrement, car plus la vitesse de rotation est élevée plus les balais doivent appuyer pour maintenir le contact [13].

### **I.6.2. Entrainement par moteur à induction**

Le moteur asynchrone, également appelé moteur à induction est l'un des plus utilisés dans l'industrie lourde (palans, ascenseurs...), mais il a aussi été utilisé dans l'automobile, par exemple dans le premier roadster électrique signé Tesla (dérivé de la Lotus). Depuis, les constructeurs automobiles lui ont préféré le moteur synchrone. Ce moteur asynchrone se compose d'un stator et d'un rotor. Le premier est un cylindre ferromagnétique dont les encoches accueillent des bobinages. Quant au second, il est constitué de deux anneaux (appelés cages d'écureuil) attachés par des conducteurs. Il peut aussi être bobiné (présence de trois bobines reliées à une bague) [13].

Les moteurs à induction se caractérisent par la simplicité de construction, la fiabilité, la robustesse, la maintenance réduite, le coût réduit et peuvent fonctionner dans des environnements hostiles. L'absence de friction des balais permet aux moteurs de relever la limite de vitesse maximale, et la vitesse nominale plus élevée permet à ces moteurs de développer un rendement élevé. Les variations de vitesse des moteurs à induction sont obtenues en modifiant la fréquence de la tension. Le contrôle d'orientation de champ (Field orientation control) d'un moteur à induction (MI) peut découpler le contrôle du couple du contrôle de champ. Cela permet au moteur de se comporter de la même manière qu'un MCC excitation séparée. Ce moteur ne souffre pas toutefois des mêmes limitations de vitesse que dans le MCC [5].

En revanche, les performances restent médiocres, avec un rendement qui plafonne entre 75 et 80 %, sauf pour Tesla qui atteint 88 % grâce à l'utilisation de cuivre pour fabriquer la cage ; ce qui n'est pas sans entraîner un certain surcoût dans la fabrication.

Pour un moteur asynchrone standard, son faible coût et sa robustesse en font le candidat idéal des véhicules hybrides où le moteur électrique ne fonctionne que de façon ponctuelle (source Industrie et Technologies). Ces moteurs présentent quelques inconvénients comme les pertes élevées, un contrôle complexe, un faible rendement, faible facteur de puissance et faible facteur d'utilisation de l'onduleur [13].

### **I.6.3. Le moteur synchrone**

Le moteur synchrone est assez semblable au moteur asynchrone. On retrouve donc un stator bobiné et un rotor à aimants permanents ou bobinés (électro-aimants). En revanche, le moteur synchrone ne peut démarrer tout seul. Il a besoin d'un moteur auxiliaire pour

atteindre sa vitesse de synchronisme ou d'un convertisseur électronique de puissance pour alimenter le stator. Ce dernier va créer un champ tournant entraînant le rotor.

Le moteur synchrone offre un meilleur rapport couple/poids et une meilleure puissance volumique. Son rendement est également supérieur à celui du moteur asynchrone en raison de l'absence de glissement. Néanmoins, le moteur synchrone présente deux inconvénients selon que l'on opte pour de l'aimant permanent ou du bobiné. Les premiers sont certes plus légers, mais fabriqués avec des terres rares. Les constructeurs cherchent donc des alternatives à ces matériaux actuellement trop chers en raison d'un quasi-monopole de la Chine dans la vente des terres rares. Quant au bobiné, il est volumineux et fragile. Malgré tout, les deux variantes de ce moteur sont très prisées par les constructeurs automobiles.

Le principal intérêt des moteurs asynchrone et synchrone réside dans la possibilité de les utiliser comme générateurs lors des freinages et des décélérations grâce à l'installation d'un onduleur réversible à courant triphasé. L'énergie ainsi récupérée permet de recharger la batterie [13].

### **I.6.3.1. Entrainement par moteur à réluctance variable**

Le moteur à réluctance commutée est un moteur électrique qui fonctionne par couple de réluctance. Contrairement aux types courants de moteurs à courant continu à balais, la puissance est fournie aux enroulements du stator plutôt qu'au rotor.

C'est la technologie la plus récente concernant les moteurs électriques de traction. Apparu de manière plus répandue à partir des années 2010 pour les machines de précision (moteur à réluctance commutée qui est un type de moteur pas à pas) en raison des pas précis qu'il peut générer, Tesla (entres autres) a finalement eu l'idée de l'utiliser pour la propulsion.

Tesla est l'un des premiers à utiliser ce type de moteur avec Toyota. Tout d'abord parce que la marque aime les moteurs pas chers (comme les moteurs à induction qu'elle exploite encore) mais aussi et surtout que ça permet une bien meilleure efficacité à haut régime (et donc haute vitesse), cela parce qu'il n'y a pas de force de retour dans le stator comme l'induit un moteur à aimants permanents (à haute vitesse, l'aimant du rotor induit à son tour un courant parasite dans le stator ... A la clé surchauffe et force contraire qui freine le tout. C'est pour ça que même en descente avec le vent derrière vous ne pourrez jamais dépasser la vitesse maxi avec un moteur à aimants permanents. Soit force électromotrice arrière).

Ce moteur est plein d'avantages, notamment économique : pas cher à produire il est aussi compacte et léger Son rendement est désormais très bon grâce à l'emploi de matériaux optimaux. On parle aujourd'hui d'un rendement jusqu'à 95%, ce qui est pour le coup le

meilleur moteur électrique qui soit. Cela est en grande partie dû au fait que ce moteur ne chauffe pas beaucoup, et donc on a moins de perte thermique (un moteur thermique perd la majorité de son énergie en chaleur ...) [14]. Mais les principaux inconvénients de ce type de machine se résument à : la génération du bruit acoustique, les ondulations élevées du courant et du couple, la topologie spéciale du convertisseur. Tous ces points cités auparavant constituent un handicap pour les moteurs à réluctance variable dans le domaine des véhicules électriques.

### **I.6.3.2. Entrainement par moteur synchrone à aimant permanent**

Le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) peut être considéré comme un croisement entre un MI et un MCC sans balai. Ils ont des structures de rotor similaires aux moteurs MCC qui contiennent des aimants permanents. Les avantages de MSAP sont bien connus.

Aujourd'hui, 93 % des moteurs de véhicules électriques sont à aimants permanents. Ce moteur est plébiscité par la grande majorité des constructeurs, principalement pour deux raisons. La première est que l'excitation magnétique créée par les aimants ne consomme pas d'énergie. Le moteur possède donc naturellement un bon rendement, du moins sur une certaine plage de vitesse et de couple. Pour une autonomie donnée, cela permet de mettre une batterie de moindre capacité, donc moins chère et moins lourde. La deuxième raison est sa compacité. Pour un couple et une puissance maximale donnée, le moteur est plus léger et moins volumineux que les autres technologies.

La compacité du moteur est un critère de choix prédominant pour les véhicules hybrides, en raison de la place limitée pour loger une ou plusieurs machines électriques. Cela l'est moins pour un véhicule tout électrique [15].

Les commandes des moteurs MSAP présentent les inconvénients en ce que l'aimant est coûteux et que la résistance mécanique de l'aimant rend difficile l'établissement d'un couple élevé dans le moteur. Les moteurs CC sans balai à aimant permanent ne disposent pas de balai pour limiter la vitesse, mais des questions subsistent quant à l'intensité de fixation de l'aimant, car elle limite la vitesse maximale si les moteurs sont du type à rotor intérieur [5].

### I.6.4. Comparaison entre quatre types d'entraînement

	<b>MCC</b>	<b>MI</b>	<b>MRV</b>	<b>MSAP</b>
<b>Cout de moteur</b>	Passable	Bon	Très bon	Moyen
<b>Coût électronique de puissance</b>	Très bon	Passable	Bon	Moyen
<b>Efficacité</b>	Moyenne	Elevée	Elevée	Elevée
<b>Poids</b>	Moyenne	Moyenne	Faible	Elevée
<b>Rendement maximale</b>	Bon	Passable	Moyen	Très bon
<b>Rendement moyen</b>	Moyen	Bon	Bon	Très bon
<b>Vitesse maximale</b>	Passable	Bon	Bon	Bon
<b>Espace couple-vitesse</b>	Moyen	Moyen	Bon	Très bon

**Tableau I.1.**Avantages et inconvénients des moteurs utilisées dans les VE

### I.7. L'électronique de puissance dans le véhicule électrique

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie de caractéristiques différentes, à bord du véhicule électrique (VE) nécessite l'adoption des convertisseurs statiques. Ces derniers peuvent avoir les plus utilisés dans la chaîne de traction du véhicule électrique sont : le redresseur, le hacheur et l'onduleur.

#### I.7.1. Les redresseurs (AC/DC)

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés 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 [2]. Il s'agit d'un des principaux éléments qui composent les chargeurs, que l'on trouve sur les véhicules électriques ou hybrides rechargeables, intégrés à leur prise de recharge.

#### I.7.2. Les hacheurs (DC-DC)

Le convertisseur statique utilisé dans la chaîne de traction est un hacheur, ce convertisseur est dit direct de type continu-continu. Il permet de faire varier la tension aux bornes du moteur et par conséquent la vitesse.

Grâce à sa simplicité et au besoin d'élever une tension, la topologie la plus commune est le hacheur parallèle classique (Boost) [3].

### I.7.3. Les onduleurs (DC-AC)

En traction électrique, l'onduleur est un convertisseur continu-alternatif, qui permet d'obtenir trois phases de courant alternatif, décalés de  $\frac{2\pi}{3}$  (120), de fréquence variable allant de zéro à 50 Hz à partir d'un courant de batterie. Cette technologie permet d'adapter les moteurs alternatifs fabriqués en grande série, qui sont simples, robustes, et peu onéreux.

Ce type de convertisseur fait varier uniquement la fréquence et permet d'obtenir ainsi une vitesse de rotation variable. Ce procédé donne une puissance et un rendement correct à tous les régimes (La vitesse de rotation d'un moteur à courant alternatif est fixée par la fréquence ; la tension fixe le couple) [1].

### I.7.4. Le chargeur

#### I.7.4.1 Différents types de chargeurs

La recharge d'un véhicule électrique (VE) constitue un enjeu stratégique pour les constructeurs automobiles et forme un réel défi à relever avant de pouvoir comparer ces véhicules à la simplicité d'usage du véhicule thermique. En effet, l'autonomie limitée, la durée de recharge de la batterie, le coût du déploiement d'une infrastructure de charge rapide, l'impact significatif sur les réseaux électriques et le coût élevé de la batterie sont à l'origine de plusieurs projets de recherche axés sur l'optimisation de la chaîne de recharge du VE.

Les premières générations de VE présentaient une autonomie allant de 120 à 150 km. Aujourd'hui les VE moyenne gamme annoncent 300 km d'autonomie. Quelle que soit la génération de VE, une infrastructure de recharge bien répartie s'avère indispensable pour pallier à leurs limitations d'usage et pour rassurer les utilisateurs. Deux grands types de chargeurs ont été définis pour cette fonction [16].

- **Les chargeurs de type " lents " :** ou monophasée dite la charge quotidienne (infrastructure peu coûteuse, installée au domicile ou au travail). 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.
- **Les chargeurs de type " rapides " :** dite la charge sur long trajet (borne de recharge rapide, déploiement à grande échelle). Le chargeur de type rapides est un dispositif d'une puissance transistée est supérieure à 10 kW, 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.

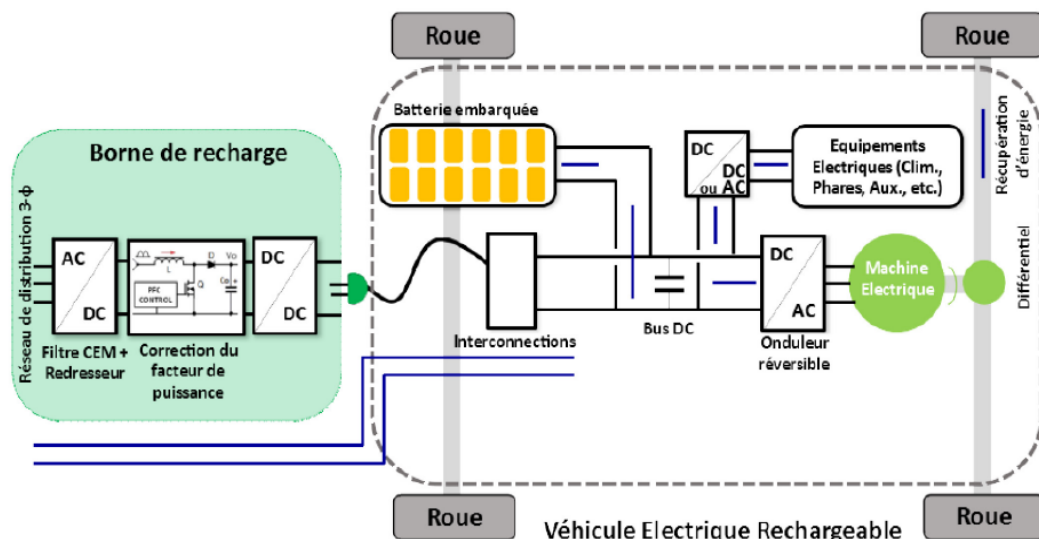
Par ailleurs, le type de charge, station rapide dédiée (triphase) ou à domicile (monophasée), impacte la durée de recharge de la batterie. Le tableau I.2 fournit un exemple de durées et de puissances de recharge pour une batterie Lithium-ion de capacité 22 kWh rechargée en Europe.

Durée de recharge (pour un état de charge à 100%)	Réseau électrique	Puissance de recharge	Niveau de tension du réseau Electrique en Europe ( $V_{eff}$ )	Niveau de courant absorbé au réseau ( $I_{eff}$ )	Type de charge
6-8 h	AC monophasé	3.7 KW	230 V	16 A	Lente
3-4 h	AC monophasé	7.4 KW	230 V	32 A	
2-2h30	AC triphasé	11 KW	400 V	16 A	
1-1h30	AC triphasé	22 KW	400 V	32 A	Rapide
20-30min	AC triphasé	43 KW	400 V	63A	
20-30min	Réseau DC	50 KW	400 Vdc	100 Adc	

**Tableau I.2.** Durées et puissances de recharge pour une batterie 22 kWh [16].

Plusieurs structures de conversion existent. Les principales notions, définissant les différents types de chargeur sont présentés selon leur emplacement et leur niveau de puissance :

- ❖ **Chargeur externe :** installé à l'extérieur du véhicule, l'énergie électrique adaptée aux caractéristiques de la batterie, est fournie directement au véhicule.



**Fig. I.8.** Chargeur externe d'un VE-intégré à la borne de recharge [16].

- ❖ **Chargeur embarqué** : intégré au sein du véhicule, l'énergie électrique délivrée par le réseau est transmise au véhicule. Cette configuration ne nécessite pas de convertisseur supplémentaire au sol.

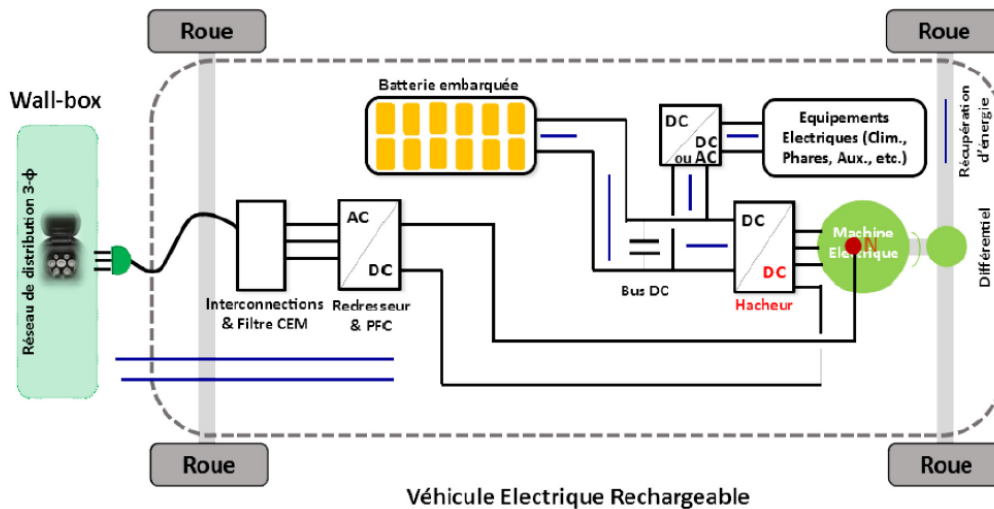


Fig. I.9. Chargeur embarqué à bord du VE et intégré à la chaîne de traction [16].

#### I.7.4.2. La recharge des voitures électriques

Pour recharger une voiture électrique, il faut qu'elle soit branchée à une source d'énergie externe afin de recevoir le courant nécessaire. Or en électricité, on distingue 2 types de courant : le Courant Continu (DC) ou le Courant Alternatif (AC). La batterie fonctionne avec un courant continu. Un véhicule électrique peut être rechargé grâce à une alimentation en courant alternatif à convertir, ou parfois directement en courant continu [17].

- ❖ **Recharge courant continu**

Le courant continu autorise une recharge rapide voir même ultra rapide. La borne en DC converti directement le courant alternatif en courant continu. Pas besoin du chargeur embarqué. Une charge DC réclame une grande intensité avec une puissance de charge pouvant aller jusqu'à 250 kWh. Couteuses à l'installation, ces bornes de recharges spécifiques s'utilisent surtout comme dispositifs de charges d'appoint pour les trajets longues distances. En quelques dizaines de minutes seulement le moteur est déjà rechargé prêt à repartir. Avec les innovations force à parier que la recharge en DC représente de belles opportunités à venir.

- ❖ **Recharge en courant alternatif**

Le courant alternatif est la norme pour tout le réseau électrique. Ainsi la recharge en AC reste la méthode la plus utilisée à ce jour. Vous pouvez brancher directement votre



véhicule sur une prise renforcée via son câble de raccordement. Ou bien utilisez une borne de recharge AC.

Le courant alternatif va être converti directement par le chargeur embarqué afin de recharger la batterie en courant continu.

La charge en AC permet une recharge normale avec un temps de charge plus long. En effet, la charge en mode courant alternatif via le chargeur embarqué dure en moyenne de 4-8h. Mais ça reste la solution parfaite pour des cycles de charges à domicile. Ainsi, l'installation d'une borne de recharge alimentée par courant alternatif reste la norme pour un usage au quotidien [17].

### **I.7.4.3. Modes de connexion des chargeurs pour véhicule électrique**

#### **- La recharge à domicile**

Les recharges à domicile constituent en général 95% des charges effectuées par un utilisateur de voiture électrique, elle a donc une importance toute particulière. Il y a deux façons de recharger une voiture électrique à domicile : sur une prise domestique standard en utilisant le câble fourni (ou en option) avec le véhicule ou en utilisant une wallbox.

#### **- La recharge à l'aide du cordon de recharge**

Toutes les voitures électriques sont fournies avec un câble permettant la recharge sur une prise domestique standard. Il est possible d'utiliser ce câble pour recharger quotidiennement la voiture électrique.

Les câbles de recharge limitent volontairement l'intensité du courant à 8 à 10A, ce qui implique des temps de recharge longs. Toutefois, si vous rechargez votre voiture toutes les nuits, cette différence de temps de recharge peut s'avérer négligeable [18].

#### **- La recharge sur une wallbox**

La wallbox est l'option la plus recommandée pour recharger son véhicule électrique. Il s'agit d'une borne de recharge pour véhicules électriques conçue pour l'usage domestique. Sa ligne électrique dédiée permettra d'assurer une recharge plus rapide et plus intelligente.

En effet, la prise domestique n'a pas été conçue pour recharger son véhicule électrique. La wallbox a, elle, été pensée pour supporter la puissance nécessaire à la recharge des véhicules électriques réguliers et rapides. Ainsi, vous pourrez recharger plus de deux fois plus vite par le biais d'une wallbox [19].



**Fig. I.10.** Wallbox pour la recharge des VE

- **La recharge d'une voiture électrique sur les bornes publiques**

Réseau en déploiement et vitesse de charge élevée Nous pouvons distinguer deux grandes catégories de bornes :

- Les bornes sur lesquelles le câble est attaché
- Les bornes où il faut ramener son câble de recharge

Les recharges sur les bornes publiques constituent 5 à 10% des recharges effectuées par les utilisateurs de voitures électrique. Ce chiffre varie en fonction du taux d'équipement des régions en bornes de recharge [19].



**Fig. I.11.** Borne de recharge publique

## **I.8. Système de stockage de l'énergie dans les véhicules électriques**

Dans un avenir proche, les véhicules électriques, y compris les véhicules hybrides et les véhicules électriques pure à batterie domineront le marché des véhicules propres. La clé et la technologie permettant ce changement révolutionnaire est le stockage d'énergie. Il existe deux types de stockage d'électricité : le stockage stationnaire de l'électricité, donc fixe, et le stockage embarqué dans les véhicules électriques ou les appareils portables. Alors que les systèmes de stockage stationnaire ont en général des capacités importantes (qui peuvent se compter en centaines de MWh), on est plutôt sur des capacités de l'ordre du kWh pour

le stockage embarqué. Le stockage de l'énergie est considéré comme le cœur d'un véhicule électrique.

Trois principales technologies des sources embarquées utilisées dans le domaine de la traction électrique (véhicule électrique). La première technologie est la batterie utilisée dans toutes les voitures électriques actuelles. La seconde technologie est la pile à combustible, considérée comme étant une solution d'avenir d'après les spécialistes de ce domaine. Enfin, la dernière technologie est représentée par les super condensateurs, une source d'énergie d'appoint capable d'assurer les forts appels de puissance et la récupération d'énergie en cas de freinage [6].

### **1.8.1. Batteries électrochimique**

Les batteries sont accumulateurs électrochimiques que l'énergie chimique magasin qui peut être convertie en énergie électrique et comme il est une source bidirectionnelle, l'énergie électrique peut être convertie en énergie chimique.

160 ans après l'invention de la batterie rechargeable au plomb par le physicien français Gaston Planté, les technologies visant à stocker l'énergie de façon électrochimique ont fait d'immenses progrès. Tous les travaux scientifiques convergent vers un même objectif commun : trouver le meilleur compromis possible entre le poids de la batterie, sa capacité de stockage, son coût de revient, sa durée de vie, sa faculté de recharge et son empreinte environnementale, notamment au moment du recyclage [20].

#### **▪ Fonctionnement**

La batterie du véhicule électrique transforme une énergie chimique en énergie électrique lors de l'alimentation électrique du véhicule et inverse le processus pour sa recharge [20].

- Dans chaque élément, 2 électrodes de matériaux différents sont séparées par un électrolyte, une substance solide ou liquide qui permet le passage du courant électrique
- Des électrons, porteurs de charges électriques (ions) issus des électrodes migrent de l'une vers l'autre, créant un courant électrique.

#### **▪ Les principaux types de batterie de VE**

Les batteries des VE (voitures électriques) se distinguent par les éléments chimiques utilisés. On distingue principalement les batteries lithium-ion, nickel-hydrure métallique.

Il est difficile de choisir la meilleure batterie de véhicule électrique, car les solutions fonctionnent mais à des fins différentes.

Batteries	Avantages	Inconvénients
<b>Cadmium Nickel</b>	-Légère -Durée de vie importante	-Haute toxicité du cadmium (n'est plus utilisée)
<b>Nickel métal Hydrure</b>	-Légère -Capacité importante (stockage énergie) -Peu polluante	-Onéreuse -Élévation de température proportionnelle à la charge, donc nécessité d'un système de refroidissement.
<b>Lithium</b>	-Tension nominale élevée (3 à 3,7 volts/élément) - Stable en charge et décharge - Importantes densités d'énergies massiques et volumiques (160 Wh/Kg et 400 Wh/l)	-Utilisation délicate (nécessité d'une gestion automatisée de l'alimentation) -Recyclage encore non maîtrisé
<b>Lithium-ion</b>	-Forte énergie massique et volumique	-Inflammabilité

**Tableau I.3.** Comparaison des différents types des batteries.

Aujourd'hui, les batteries les mieux adaptées aux applications automobiles sont incontestablement les Li-ion hautes puissances. Cette technologie est actuellement au cœur de l'offre en matière de système de stockage pour le transport.

- **Les inconvénients de la batterie de voiture électrique**

La batterie de voiture électrique peut comporter certains inconvénients en matière d'autonomie, de temps de recharge et de coût.

- **Autonomie**

Selon les mesures prises par le cycle d'homologation NDEC (New European Driving Cycle), une batterie de voiture électrique peut tenir de 160 à 200 km. Pourtant, en utilisation réelle, la batterie d'un VE tient rarement plus de 100 km [20].

Quelques astuces simples de conduite ou d'utilisation du chauffage ou de la climatisation par exemple permettent de préserver l'autonomie de la batterie.

- **Poids**

Actuellement, le poids des batteries des VE est de 250 kg : pour avoir aujourd'hui l'autonomie d'un véhicule thermique, le poids des batteries devrait s'élever à 1250 kg.

- **Sécurité**

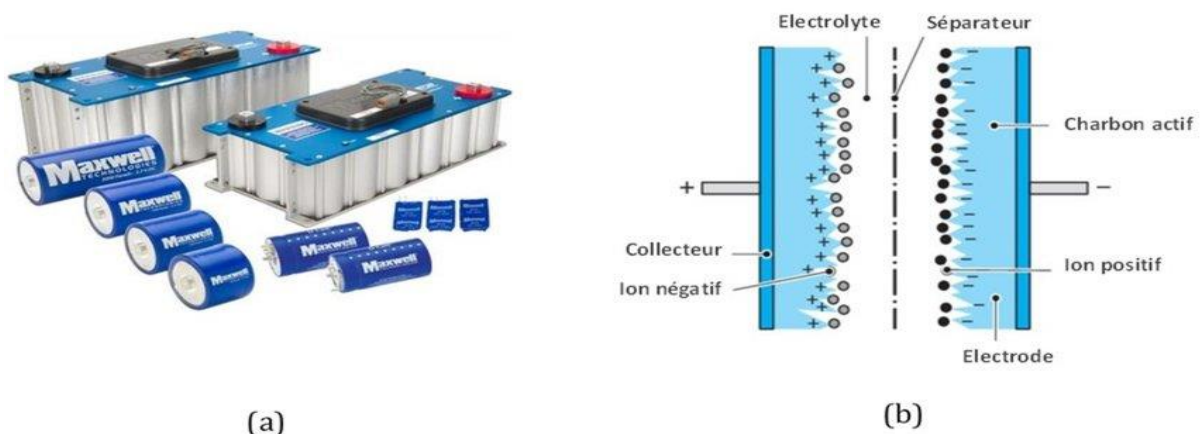
Certaines batteries lithium-ion peuvent court-circuiter avec le vieillissement et provoquer une explosion [20].

## I.8.2. Super condensateurs

Aujourd'hui, le véhicule électrique passe quasi exclusivement par les batteries lithium-ion pour assurer l'alimentation de son moteur. Bien que progressant d'année en année, cette technologie présente toujours des limites et pousse les chercheurs à redoubler d'ingéniosité pour lui trouver un remplaçant.

Utilisation de nouveaux alliages ou d'électrolyte solide, couplage à une pile à combustible... les pistes sont nombreuses et passent aussi par la voie des super condensateurs. Il faut dire que dans la théorie, ces super condensateurs présentent de très nombreux avantages face à la batterie lithium-ion.

Le super condensateur est constitué d'un empilage successif de plaques conductrices (armatures) séparées par un isolant ou « diélectrique ». Lorsque l'on branche chaque extrémité à une source électrique, les charges négatives (électrons) s'accumulent sur une armature et les charges positives (absence d'électrons) sur l'armature opposée, permettant le stockage de l'énergie [21].



**Fig. I.12.** Super condensateurs (a) et son schéma équivalent (b)

Tout d'abord, il se montre beaucoup plus stable, n'étant pas sujet aux risques d'explosion et étant capable de fonctionner sur une plus grande amplitude de température. Le super condensateur dispose également d'un cycle de vie dix fois supérieur. Il offre en plus une

puissance supérieure, est moins lourd et se recharge quasi instantanément. Ce n'est pas pour rien s'ils ont été utilisés pour les systèmes de récupération d'énergie.

Tous ces avantages se répercutent déjà sur leur prix. Mais le problème majeur, c'est qu'en plus de leur coût supérieur, les super condensateurs ont une très faible densité énergétique, jusqu'à 25 fois inférieure à celle d'une batterie li-ion avec des prototypes qui atteignent seulement 15 Wh/kg là où sa concurrente table entre 200 et 250 Wh/kg [21].

### I.8.3. Piles à combustible

La pile à combustible (PAC) est un générateur électrochimique qui convertit un combustible chimique en énergie électrique. Un véhicule à pile à combustible (VPC) ou véhicule électrique à pile à combustible est un véhicule électrique qui utilise une pile à combustible, parfois en combinaison avec une petite batterie ou un super condensateur, pour alimenter son moteur électrique embarqué.

Les piles à combustible sont alimentées par un carburant qui peut être en particulier l'hydrogène, le méthanol, l'éthanol ou l'acide formique. Ces véhicules ont un bilan carbone faible par rapport aux véhicules à moteur à combustion interne, en particulier suivant le mode de production du carburant alimentant la pile.

Encore assez peu développé, ce type de véhicule est en concurrence pour son plus faible niveau d'émission de dioxyde de carbone avec le véhicule électrique et le véhicule hybride électrique. Son bilan carbone est en particulier dépendant, comme le véhicule électrique, du mode de production de la source d'énergie : électricité ou carburant alimentant respectivement la batterie ou la pile à combustible [22].

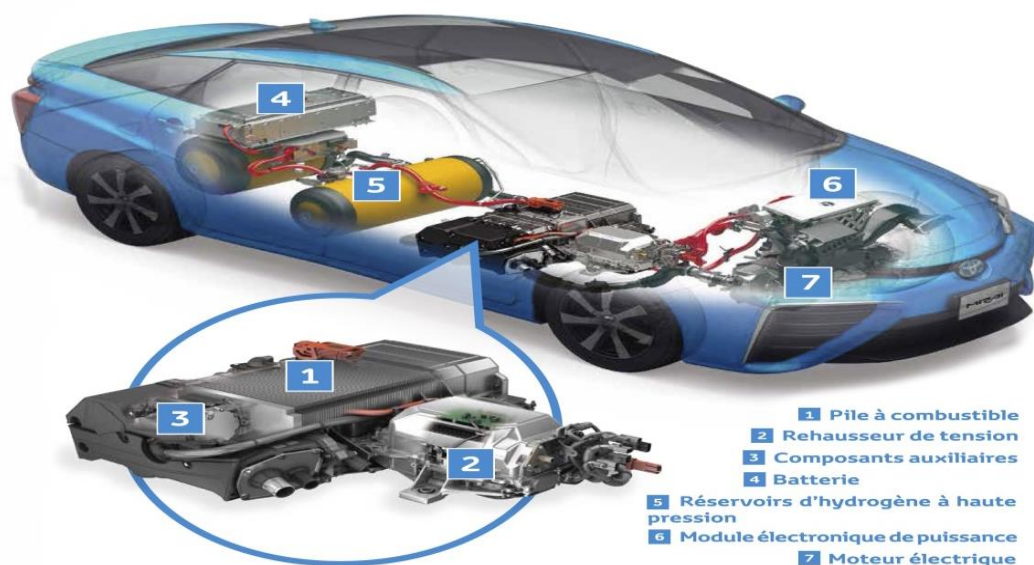


Fig. I.13. Véhicule électrique à pile à combustible

## I.9. Avantages et inconvénient des véhicules électriques

### ▪ Avantages

Le fonctionnement de la voiture électrique est pratiquement la solution idéale pour de nombreux points :

- **L'absence de pollution** : les émanations sont inexistantes, tout comme la pollution sonore.
- **Les performances** : contrairement à ce que l'on peut croire, le moteur électrique est très performant, son rendement théorique avoisine 100 % (35 % pour les moteurs thermiques). Il possède un couple maximal sur toute la plage de régime moteur, favorisant les accélérations (en comparaison dans un moteur thermique, le couple est maximal seulement à un régime moteur donné, soit entre 1 500 et 2 000 t/mn).
- **La facilité d'entretien et de maintenance** : le moteur électrique est d'une conception simple, avec peu d'éléments mécaniques en mouvement, (Le besoin de remplacer les freins et les plaquettes) contrairement aux voitures thermiques, notamment les dernières générations et leurs systèmes antipollution, complexes et onéreux à l'entretien [23].
- **La fiabilité du véhicule** : À l'exception des pneus et des garnitures de freins, les voitures électriques comptent beaucoup moins de pièces d'usure (courroies de distribution, pistons, pots d'échappement, bougies...) que leurs cousines essence ou diesel, dites thermiques. Elles sont donc moins sujettes aux pannes, n'ont besoin d'aucun préchauffage, et sont simples à conduire (il n'y a pas de boîte de vitesses). Contrairement au moteur thermique, le moteur électrique a une capacité d'accélération optimale dès le démarrage ou lors de la reprise après un arrêt. Il ne cale jamais, grâce à l'absence d'embrayage.
- **Économique** : La VE est aussi économique, elle ne consomme pas d'énergie durant les phases de ralenti parce que les batteries ont la capacité de se recharger pendant ces phases (de ralenti). Et aussi en termes de coût, l'électricité revient beaucoup moins cher que l'hydrocarbure [1].

### ▪ Inconvénients

Si la voiture électrique possède beaucoup de qualités, il faut garder quelques limites à l'esprit :

- **Le poids** : les batteries chargent considérablement la masse totale du véhicule, et pour ne pas dépasser les contraintes dynamiques, ne permettent pas une autonomie acceptable.
- **L'autonomie** : malgré les progrès constants, elle reste toujours limitée en situation réelle, restreignant d'autant son rayon d'action (entre 150 et 300 km).
- **Le coût d'achat** : bien que le prix d'achat net d'un véhicule électrique soit aujourd'hui abordable, il est conditionné par les primes gouvernementales (jusqu'à 6000 € ou jusqu'à 11 000 € avec la prime à la conversion) [23].
- **Le temps de recharge et la disponibilité des bornes** : Le temps de recharge d'un VE est variable, il dépend de la puissance disponible au point de recharge. Aujourd'hui, il faut compter environ 8h pour faire une recharge sur une prise domestique. Quant aux bornes de recharge, elles ne sont pas toutes normalisées à l'échelle européenne [1].

## I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, un aperçu en détails sur les différents types de véhicules électriques ainsi que tous les composants sont abordés en donnant les avantages et les inconvénients de chaque un, en concluant que la voiture électrique peut réellement devenir une alternative prometteuse. Le développement de la capacité et le temps de chargement des batteries reste un défi un nos jours pour la généralisation de l'utilisation du véhicule électrique. La modélisation et la commande du véhicule électrique seront envisagées dans prochain chapitre.



# CHAPITRE II

*Modélisation et commande linéaire du  
véhicule électrique étudié*

## II.1. Introduction

Le modèle de véhicule électrique est très complexe car il contient de nombreux composants différents, par exemple la dynamique du véhicule, transmission, machine électrique, électronique de puissance et les sources d'énergie. L'analyse du VE en tant que système nécessite alors la modélisation des différents composants intervenant dans sa chaîne de traction.

Dans le présent chapitre, on présente une modélisation explicite des sous-systèmes composant le véhicule électrique, à savoir : le moteur de traction (machine synchrone à aimant permanent), le convertisseur statique et la dynamique de véhicule.

## II.2. Modélisation du groupe motopropulseur

Un groupe motopropulseur se compose d'une source d'énergie, électronique de commande, un ou des convertisseurs d'énergie, une ou des machines électriques et un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel) [24].

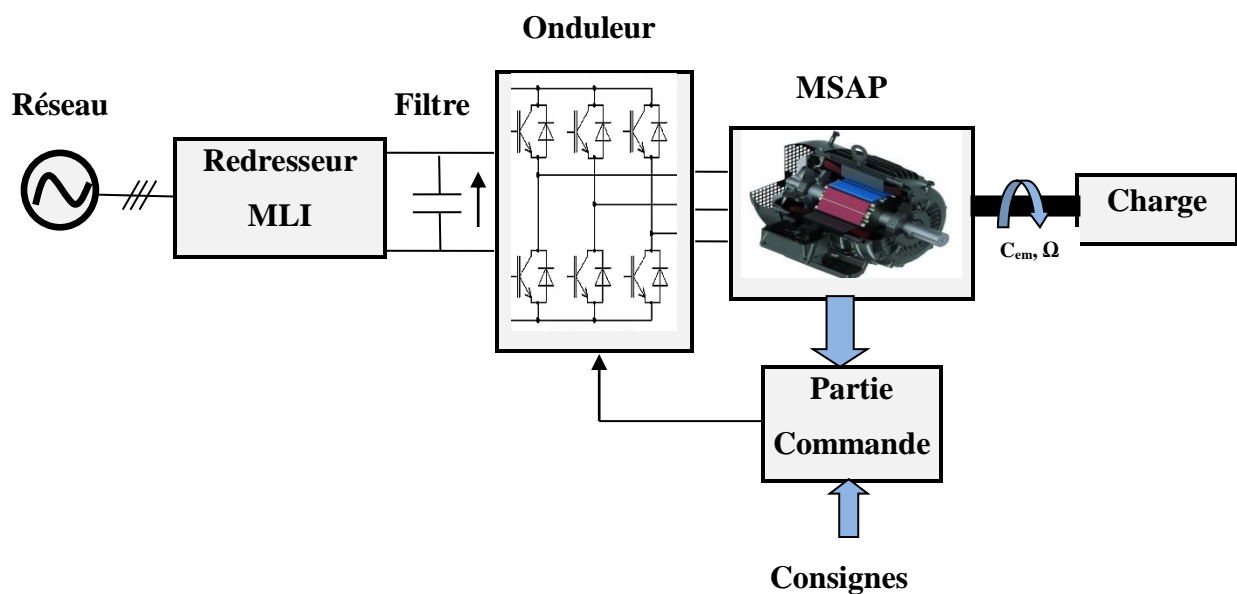


Fig. II.1.composants d'un entraînement électrique à base de la MSAP

- **Source d'énergie** : la source d'énergie comprend une pile combustible et une batterie d'accumulateur, qui a pour but de fournir (éventuellement de récupérer en cas de freinage) l'énergie électrique.
- **Partie mécanique** : il existe une transmission mécanique comprenant un réducteur entre le moteur et la roue.

- **Convertisseur statique** : Des onduleurs multi niveaux pour alimenter la machine. Cela permet de donner une forme de tension plus proche de la sinusoïde et d'améliorer la qualité du couple électromagnétique. Les semi-conducteurs utilisés sont des IGBT. Un redresseur MLI sera utilisé afin d'améliorer la qualité de courant et de la tension du réseau. Ses interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée permettant un contrôle total du convertisseur et la circulation de la puissance dans les deux sens [24] [25]
- **Partie commande** : La partie commande reçoit sur son entrée des consignes telles que : le couple demandé par l'utilisateur et la vitesse de rotation de la machine.
- **Moteur de traction** : Le moteur utilisé est de type synchrone triphasé à aimants permanents. L'intérêt de ce type de machine est sa grande fiabilité, son rendement plus élevé, possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes, sa puissance massique élevée, ce qui est important pour les systèmes embarqués. Une commande vectorielle est appliquée à la machine pour pouvoir contrôler le flux et le couple séparément et permettre ainsi la commande en vitesse de la machine [1] [25].

## II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanent

### II.3.1. Description de la MSAP triphasée

La machine synchrone à aimant permanent comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à  $p$  pair de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à  $120^\circ$ . Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et à amplitude réglables [26].

Le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) plus performant et plus compact grâce à sa puissance massique élevée. Dans la MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants, le champ d'excitation créé par les aimants permanents présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. La MSAP est largement utilisée dans plusieurs applications telles que dans la traction électrique, la robotique [6].

Dans la MSAP, le champ du flux rotorique est considéré comme constant, et l'effet de saturation est négligeable, suite aux propriétés physiques de l'aimant.

Suivant la position géométrique de l'aimant dans la machine, on distingue deux types de machines [27] :

- La machine à pôles lisses où l'aimant est monté sur la surface du rotor, l'entrefer effectif large obtenu a pour conséquences d'atténuer les effets de saillance et de réaction d'armature.

- La machine à pôles saillants où l'aimant est insérée dans la matière du rotor.

### II.3.2.Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation qui est constitué d'aimants permanent produisant un champ tournant d'induction. Les champs d'induction créés par le rotor et le stator ont tendance à s'aligner et un couple d'origine électromagnétique se crée. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [28].

### II.3.3. Modèle de la MSAP dans le repère triphasé ABC

Le modèle en abc, découlant des équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.

Le comportement de toute machine électrique est entièrement déterminé par les équations. La représentation schématique de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique est donnée sur Fig. (II.2).

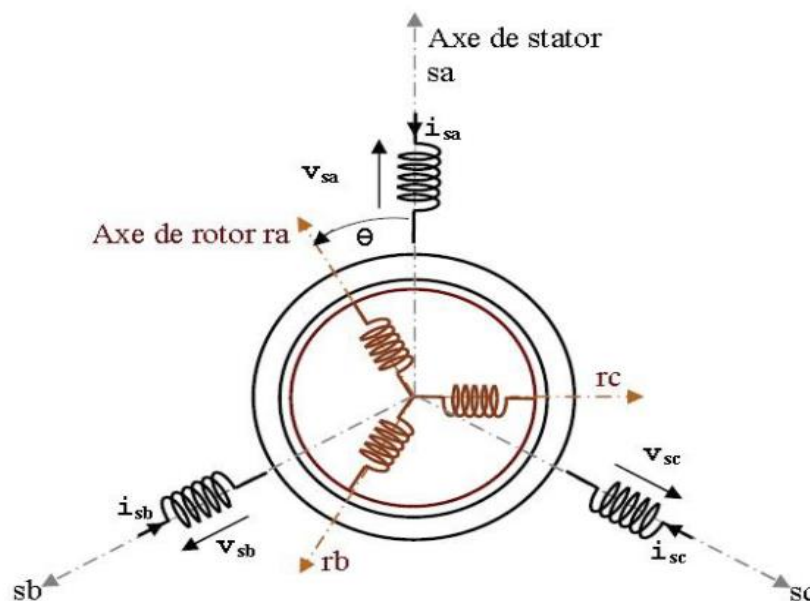


Fig. II.2. Modèle de la machine synchrone dans le repère triphasé

Les équations de la machine s'écrivent comme suit :

### II.3.3.1. Equations électriques

Les équations de la tension statoriques est données par :

$$[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \quad (\text{II.1})$$

Avec:

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, [I_{abc}] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, [\Phi_{abc}] = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Avec,  $V_{abc}$ ,  $I_{abc}$ ,  $\Phi_{abc}$  représentent respectivement les tensions de phases statoriques, les courants de phases statoriques et les flux totaux produits par les courants statoriques.  $R_s$  Indique la résistance d'une phase statorique.

### II.3.3.2. Equations magnétiques

Les équations du flux statoriques (équations magnétiques) peut être exprimé sous forme matricielle comme suit :

Les flux totaux  $\Phi_{sabc}$  sont exprimés par :

$$[\Phi_{sabc}] = [L][I_{abc}] + [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.3})$$

Où

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{SS} & M_S & M_S \\ M_S & L_{SS} & M_S \\ M_S & M_S & L_{SS} \end{bmatrix}, \quad \Phi_{rabc} = \Phi_f \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $L_{SS}$  et  $M_s$  représentent l'inductance propre et l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques

La substitution de l'équation (II.3) dans l'équation (II.1) donne :

$$[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + [L] \frac{d}{dt} [I_{abc}] + [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.5})$$

Le couple électromagnétique est exprimé par :

$$C_{em} = \frac{1}{\omega_m} ([e_{abc}]^T [i_{abc}])$$

$[e_{abc}] = \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}]$  représentent les FMMs produites dans les phases statoriques.  $\omega_m$  définit la vitesse de rotation du rotor en (rad/s).

On remarque que le système (II.5) engendre des équations fortement non-linéaires et couplées. Pour simplifier ce modèle, la majorité des travaux dans la littérature préfèrent utiliser une transformation vers un système biphasé, dite transformation de Park. Cette transformation rend les équations des moteurs à courant alternatif plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse.

### II.3.4. Modèle diphasé

Le modèle synchrone dans le référentiel (a, b, c) étant fort complexe, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables, le but des transformations matricielles est de le simplifier. Cette simplification réduit l'ordre de système.

- On utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

- Pour étudier les machines synchrones, nous pouvons utiliser une représentation dans un repère diphasé. L'utilisation de ce modèle permet de voir l'effet des champs tournants, modélisés sous forme de vecteur tournant, sur la création du couple. Bien qu'il soit possible de définir les vecteurs dans un repère quelconque, nous les décrivons soit dans le repère du rotor (d, q) à l'aide de la transformée de Park, soit dans le repère du stator ( $\alpha, \beta$ ) d'après la transformée de Concordia. [24] [26].

- Le repère de Park (d, q, o) est a priori quelconque, on peut ainsi considérer qu'il tourne à une vitesse arbitraire. Des choix plus ou moins pertinents peuvent être faits en fonction du repère auquel on lie la représentation de Park. Tandis que la transformation de Concordia conserve la puissance instantanée elle est donc invariante en puissance.

- Le modèle issu de la transformation de Park ou de Concordia, utilisés couramment pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des moteurs [28].

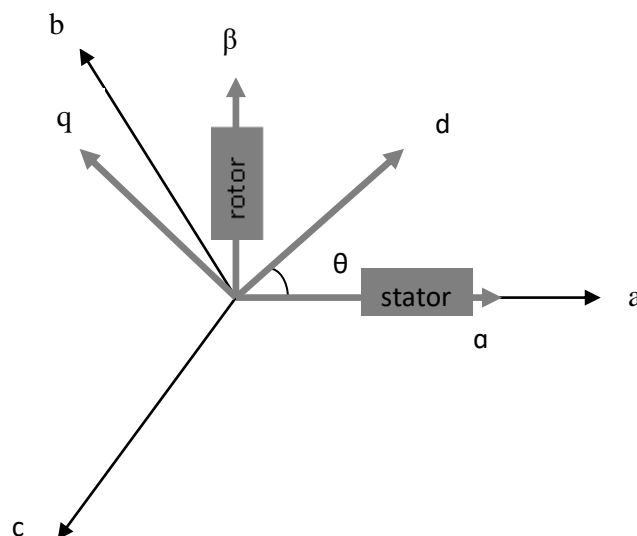


Fig. II.3. Représentation des différents repères

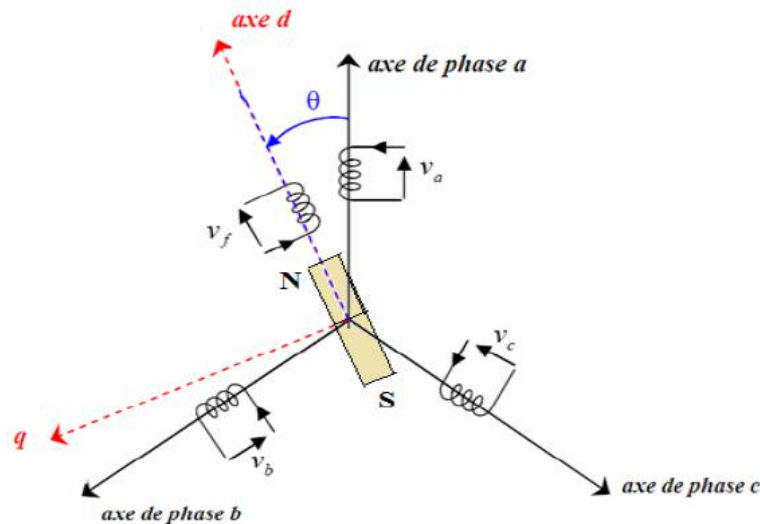
### II.3.5. La transformation de Park

Les modèles appropriés aux machines électriques les plus utilisées, sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapport les équations électriques et rotoriques à un système cartésien d'axes (d,q).

#### II.3.5. 1.Principe de transformation de Park

Dans le repère classique il y a trois axes (as, bs, cs) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. D'habitude, l'axe as est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe (f correspondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrone à aimant permanent  $\Theta$  donne la position du rotor par rapport au stator [6].

La transformation de Park est un outil mathématique consiste à transformé le système triphasé (a,b,c) en un système diphasé (d,q). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor, l'aimant se situe sur l'axe d. Les variables et les paramètres sont alors représentés dans un référentiel à deux axes: l'axe direct (d) et l'axe de quadrature arrière (q), perpendiculaires, l'angle  $\theta$  entre les deux repères est appelé angle Park [28].



**Fig. II.4.** Représentation de la transformation de Park

La transformation de Park est définie comme suit :

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)][X_{abc}] \quad (\text{II.5})$$

Où : X représentent les grandeurs électriques (tensions, courants ou flux).

La matrice de transformation  $P(\theta)$  est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Dont la matrice inverse a pour forme:

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T$$

Et à l'aide de l'équation (II.5), on peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle comme suit:

$$[u_{dq}] = [P(\theta)][V_{abc}] = [P(\theta)][R][I_{abc}] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \quad (\text{II.7})$$

Ensuite, en se basant sur (II.7) et (II.3), on obtient :

$$[u_{dq}] = [P(\theta)][R][P(\theta)]^{-1}[I_{dq}] + [P(\theta)][P(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + [P(\theta)] \left( \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) [\Phi_{dq}] \quad (\text{II.8})$$

Du moment que  $[R]$  est diagonale, alors :

$$[P(\theta)][R][P(\theta)]^{-1} = [R] \quad (\text{II.9})$$

En utilisant :

$$[P(\theta)] \left( \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \right) = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Et à l'aide de (II.9), on peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle comme suit :

$$[u_{dq}] = [R][I_{dq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dq}] + p\omega_r [\Phi_{dq}] \quad (\text{II.11})$$

Où:

$$[u_{dq}] = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, [I_{dq}] = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}, [\Phi_{dq}] = \begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}, [\Phi'_{dq}] = \begin{bmatrix} \Phi_q \\ -\Phi_d \end{bmatrix}$$

Et la transformation (II.6) appliquée à (II.3) donne :

$$\begin{bmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$u_{dq}$  : Tensions stator dans le repère (d, q)

$I_{dq}$  : Courants stator dans le repère (d, q)

$R$ : Résistance d'une bobine de stator



$\Phi_{dq}$  : Flux selon les axes d, q

$L_{dq}$  : Inductances cycliques selon les axes d, q

Le couple électromagnétique est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les FMMs dans l'entrefer généré par les courants statoriques. Il est exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_d I_q - \Phi_q I_d) = \frac{3}{2} p (\Phi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (II.13)$$

$\Phi_f$ : flux des aimants

p : nombre de paires de pôles

### II.3.6. Equations mécaniques

L'équation électromécanique est exprimée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f_v \omega_r \quad (II.14)$$

Ou :  $\omega = p \omega_r$

$\omega$ : vitesse de rotation mécanique de la MSAP

J: moment d'inertie totale de la machine

f : coefficient de frottement visqueux

$C_r$ : couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine

$\omega_r$  : vitesse de rotation mécanique de la MSAP

A partir de l'équation (II.11) et le système d'équations (II.13), on peut constater que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents est un système multi variable, non linéaire et en plus il est fortement couplé entre les variables d'entrées (tension, fréquence), les variables de sorties (couple, vitesse) et les variables internes de la machine comme le flux, la commande donc de la machines est difficile. il est donc intéressant de trouver un moyen de rendre le contrôle de ces grandeurs indépendant afin d'améliorer les performances de ces machines [28].

### II.4. La commande vectorielle de la MSAP

En 1971, Blaschke a proposé une nouvelle théorie de la commande connue sous le nom du flux orienté appelée aussi commande par orientation de flux FOC (Field Oriented Control). L'idée fondamentale de cette stratégie est rendre le comportement de la machine synchrone à aimants permanents à celui d'une machine à courant continu, Cette technique de commande

permet de découpler le réglage de flux rotorique et du couple électromagnétique de la machine MSAP puisque le couple dépend uniquement du courant  $I_q$ , ce qui va permettre l'obtention de performances considérables, relatives à la réponse du système en régime dynamique semblable à celle des machines à courant continu [32].

Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent.

### II.4.1.Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle porte en générale sur des machines alimentés en tension et régulées en courant sur les axes d et q. Cette topologie permet une meilleure dynamique dans la commande du couple tout en évitant l'inconvénient d'une alimentation du courant. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Par conséquent, ceci permet de contrôler le flux de la machine avec la  $I_{ds}$  du courant statorique. Tandis que, la composante  $I_{qs}$  permet de contrôler le couple électromagnétique correspond au courant induit de la (MCC).

Si le courant  $I_{ds}$  est dans la même direction que le flux rotorique, le flux statorique suivant l'axe (d) s'ajoute au flux des aimants, ce qui donne une augmentation au flux d'entrefer. D'autre part, si le courant  $I_{ds}$  est négatif, le flux statorique sera en opposition à celui du rotor, ce qui donne une diminution du flux d'entrefer (défluxage).

Le couple électromagnétique développé par la (MSAP) peut s'écrire dans le référentiel de Park (d, q) sous la forme (II.13) suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_d I_q - \Phi_q I_d) = \frac{3}{2} p (\Phi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q)$$

Les stratégies de commande utilisées consistent à maintenir la composante directe du courant  $I_d$  égale à zéro. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant [6] [27] [28].

D'autre part, si le courant  $I_d$  est maintenu nul, physiquement le flux de réaction d'induit est en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants permanents.

$$I_d = 0 \rightarrow I_q = I_s \quad I_s : \text{Vecteur courant statorique}$$

Donc :  $\Phi_d = \Phi_f$

L'expression du couple donnée par la relation (II.13), devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \Phi_f I_q \tag{II.15}$$

Comme le flux  $\Phi_f$  est constant, le couple électromagnétique est directement proportionnel à  $I_q$  donc :

$$C_{em} = K I_q \tag{II.16}$$

Ou :  $K = \frac{3}{2} p \Phi_f$

On remarque que l'expression du couple électromagnétique est la même que celle d'une machine à courant continu à excitation séparée et qu'un contrôle indépendant du couple et du flux est établi. Le modèle de la machine dans le repère de Park est devient :

$$\begin{cases} U_d = -\omega_r L_q I_q \\ U_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_r \Phi_f \end{cases} \tag{II.17}$$

### II.4.2 Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

#### II.4.2.1 Description du système global

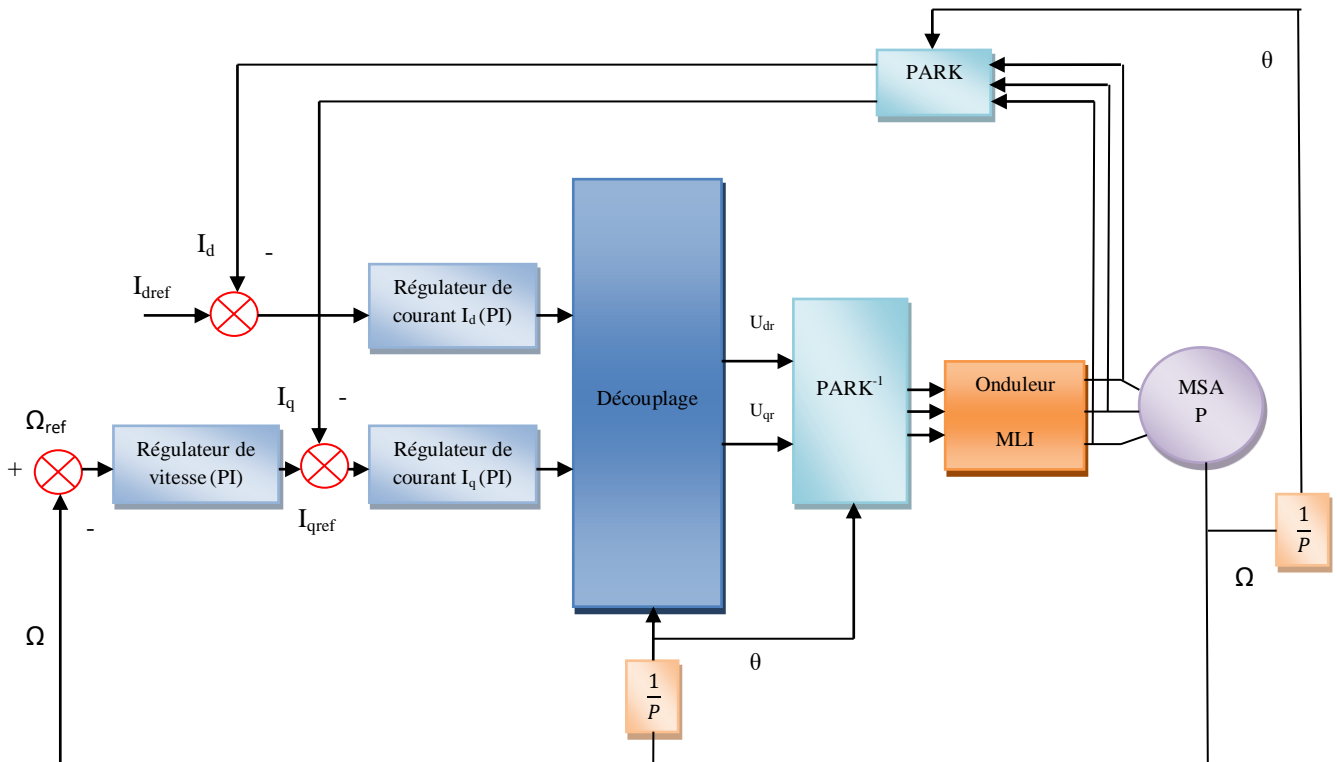


Fig.II.5. Schéma global de la commande vectorielle de la MSAP

La figure (II.5) représente le schéma global de la structure de commande vectorielle en vitesse d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d, q), Les principaux constituants dans la commande vectorielle sont la boucle de régulation de vitesse, celle des courant  $i_d$  et  $i_q$  et transformation de Park.

La commande vectorielle revient alors à contrôler les deux composantes ( $I_d$ ) et ( $I_q$ ) du courant statorique en imposant les tensions ( $U_d$ ) et ( $U_q$ ) qui conviennent. Pour imposer les tensions ( $U_d$ ) et ( $U_q$ ), il suffira d'imposer les tensions de référence ( $U_{dref}$ ) et ( $U_{qref}$ ) à l'entrée de l'onduleur.

La référence du courant direct  $I_{dref}$  est fixée à zéro (pour obtenir le couple maximal) et la vitesse est régulée à travers la boucle externe du bloc, la sortie de son régulateur est permise de générer le courant de référence  $I_{qref}$  constitue la référence du couple  $C_{em ref}$ . Les références des courants  $I_{dref}$  et  $I_{qref}$  sont comparées séparément avec les courants réels mesurés de la machine  $I_d$  et  $I_q$  respectivement. Les erreurs des courants sont appliquées à l'entrée des régulateurs des courants de type PI. Les sorties des régulateurs de courant  $I_d$  et  $I_q$  sont appliquées à un bloc de découplage qui permet de générer les tensions de référence  $U_{dref}$  et  $U_{qref}$ . Le système est muni d'une boucle de régulation de vitesse, qui permet de générer la référence de courant  $I_{qref}$ . Cette référence est limitée au courant maximal. Par contre, le courant  $I_{dref}$  est imposé nul dans ce cas.

Les références des tensions  $U_{dref}$  et  $U_{qref}$  passent par une transformation de Park inverse, biphasé vers triphasé  $U_{aref}$ ,  $U_{bref}$  et  $U_{cref}$  qui représentent les tensions de la commande de l'onduleur à commande MLI.

### II.5. Découplage

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires  $\omega_r I_q$ ,  $\omega_r I_d$ ,  $I_d I_q$

$$\begin{cases} U_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r L_q I_q \\ U_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega_r (L_d I_d + \Phi_f) \end{cases} \quad (II.18)$$

La figure (II.6) représente le couplage entre les axes d et q.

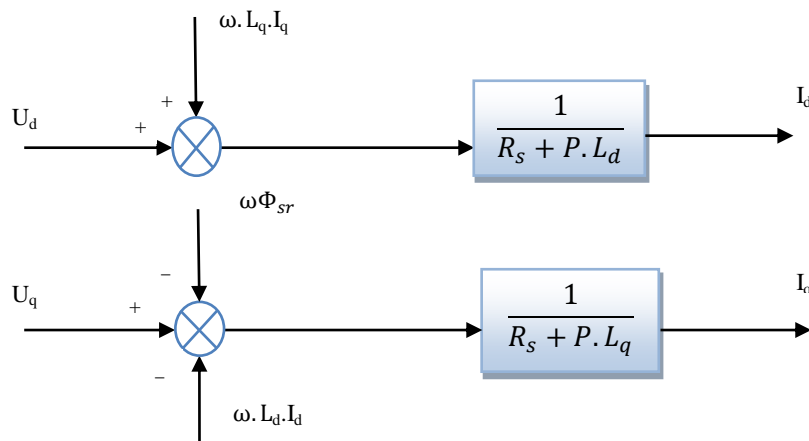


Fig.II.6. Description des couplages

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation. Cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes d et q complètement indépendants.

### II.5.1 Découplage par compensation

La compensation donc, a pour but de découpler les axes d et q. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande  $e_d, e_q$  telle que [28] :

$$\begin{cases} U_d = U_{d1} - e_d \\ U_q = U_{q1} + e_q \end{cases} \quad (II.19)$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{d1} = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \\ U_{q1} = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (II.20)$$

Et :

$$\begin{cases} e_d = \omega_r L_q I_q \\ e_q = \omega_r (L_d I_d + \Phi_f) \end{cases} \quad (II.21)$$

Ou :

$U_{d1}$ : La tension à la sortie de régulateur de courant  $I_d$ .

$U_{q1}$ : La tension à la sortie de régulateur de courant  $I_q$ .

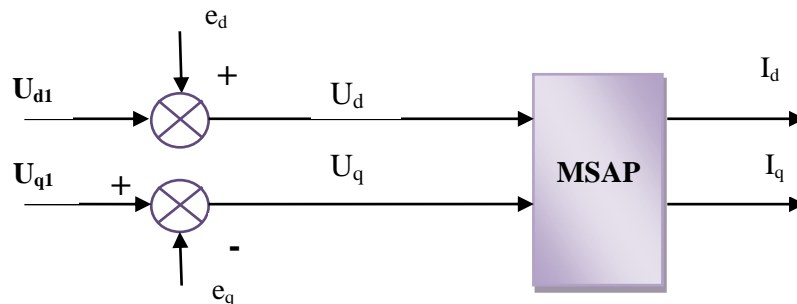
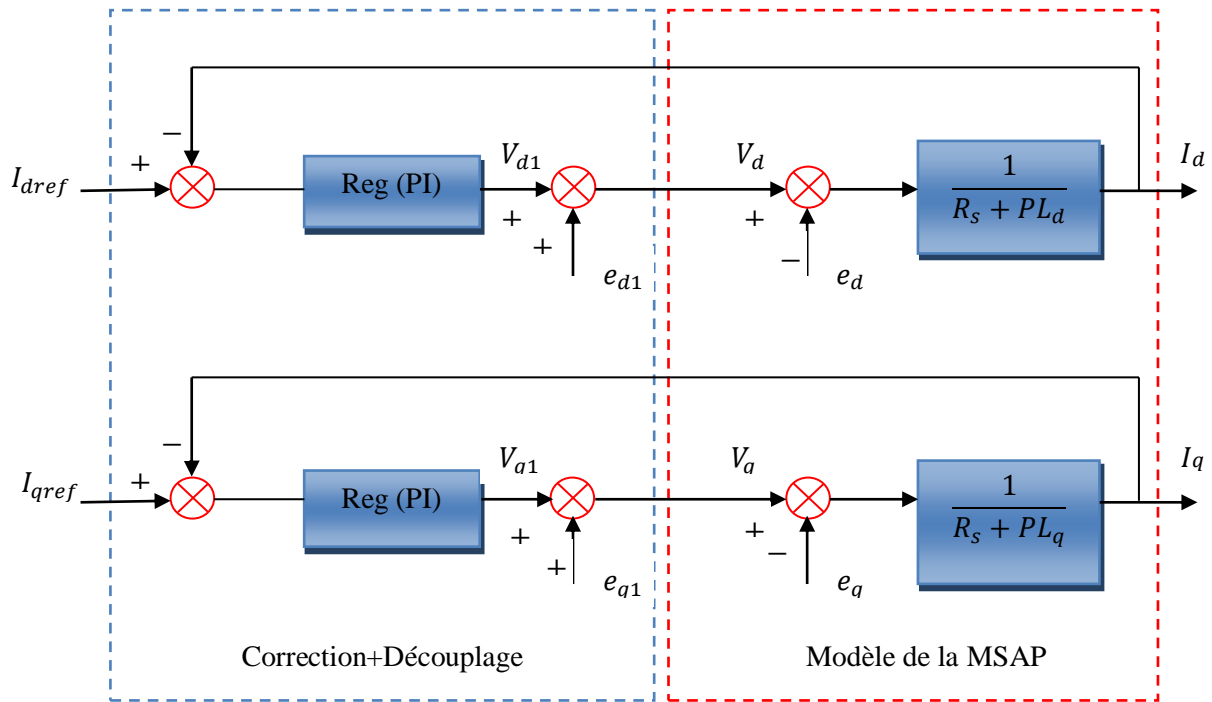


Fig.II.7. Description de la compensation

Les courants  $I_d$  et  $I_q$  sont découplés. Le courant  $i_d$  ne dépend que de  $U_d$  et  $I_q$  ne dépend que de  $U_q$ , à partir de l'équation (II.20) les courant  $i_d$  et  $i_q$  s'écrivent comme suite :

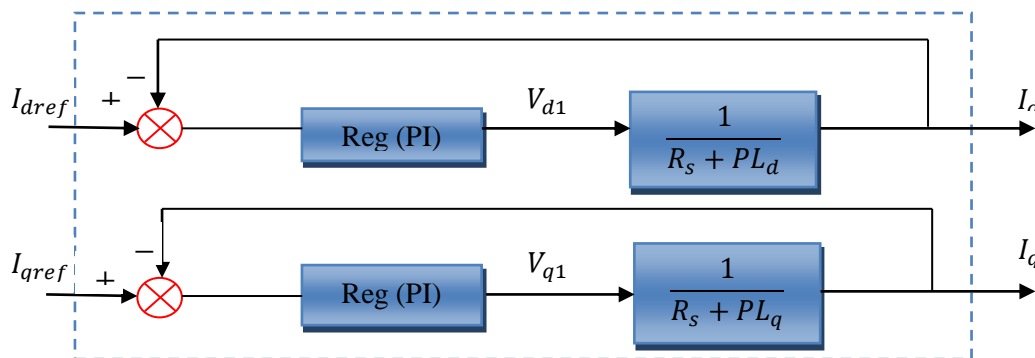
$$\begin{cases} I_d = \frac{U_{d1}}{R_s + PL_d} \\ I_q = \frac{U_{q1}}{R_s + PL_q} \end{cases} \quad (II.22)$$

Le principe de correction (régulation) consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques PI.



**Fig.II.8.** Principe de découplage par compensation

Les actions sur les axes  $d$  et  $q$  sont donc découplés et représentées par la (Figure II.9).



**Fig.II.9.** Commande découplée

## II.6. Synthèse des régulateurs

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale à la grandeur de référence impose malgré la présence des perturbations internes ou externes.

Lorsque le découplage entre l'axe d et l'axe q est réalisé, la régulation des courants est effectuée à l'aide des régulateurs de type La régulation est effectuée à l'aide des régulateurs de type PI ou PID (proportionnelle, intégrale, dérivée). Les algorithmes, même les plus performants, sont toujours une combinaison de ces actions.

Il faut noter que les besoins pour la commande d'un système doivent inclure plusieurs facteurs tels que la réponse au signal de commande, la sensibilité au bruit de mesure au rejet de perturbations. Dans tel contexte, des simples régulateurs (P, PI et PID) peuvent convenablement satisfaire ses contraintes [26] [28].

Théoriquement :

- Le coefficient intégral  $K_i$  sert de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée donc de réduire le dépassement.
- Le coefficient proportionnel  $K_p$  permet le réglage de la rapidité du système et donc le temps de réponse.

Nous allons régler la vitesse de la machine en proposant un régulateur de type PI, ce choix justifier par :

- ✓ Simplicité de la réalisation et de son réglage (auto réglable).
- ✓ La connaissance maitrise de ce type de régulateur et de son application dans l'industrie et sa robustesse de commande.
- ✓ Son prix de revient moins cher.

La fonction de transfert du régulateur proportionnel intégral est donnée, sous forme générale, par l'équation pour les deux axes d et q :

$$F(P) = K_p + \frac{K_i}{P} \quad (\text{II.23})$$

Avec :  $K_p$  : Gain proportionnel.

$K_i$  : Gain intégral.

P: L'opérateur de Laplace.

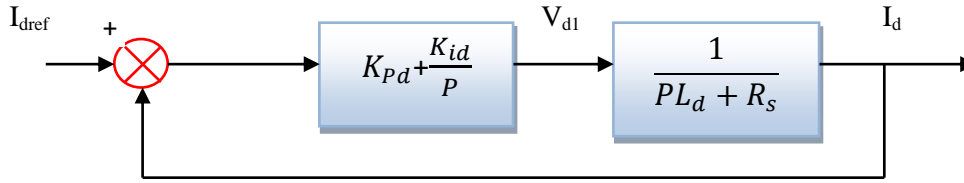
### II.6. 1. Calcul des régulateurs

La commande de la MSAP s'accomplit en contrôlant les courants  $I_d$  et  $I_q$  à partir de la boucle de régulation de la vitesse qui entre dans la composition du système de telle manière à imposer le courant de référence  $I_{qref}$ , et garder le courant  $I_d$  nul.

Les régulateurs de courant et de vitesse peuvent être synthétisés ici au moyen des techniques classiques développées pour les systèmes linéaires.

### II.6.1.1. Régulateur de courant $I_d$

La boucle de régulation sur l'axe d est présentée par la figure suivante :



**Fig.II.10.** Boucle de régulation du courant  $I_d$

La fonction de transfert du régulateur proportionnel intégral est donnée, sous forme générale:

$$F(P) = K_p + \frac{K_i}{P} \quad (\text{II.24})$$

En boucle ouverte la fonction de transfert est donnée par :

$$FTBO(P)_{id} = \left( K_{pd} + \frac{K_{id}}{P} \right) \left( \frac{1}{PL_d + R_s} \right) = \frac{K_{id}}{P} \left( \frac{K_{pd}}{K_{id}} \cdot P + 1 \right) \left( \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \left( \frac{L_d}{R_s} \right) \cdot P} \right)$$

$$FTBO(P)_{id} = \frac{K_{id}}{P} \left( \frac{K_{pd}}{K_{id}} \cdot P + 1 \right) \left( \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_d \cdot P} \right) \quad (\text{II.25})$$

Avec:  $T_d = \frac{L_d}{R_s}$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF(P)_{id} = \frac{FTBO(P)_{id}}{FTBO(P)_{id} + 1}$$

- **Calcul des paramètres du régulateur « PI »**

Compensons le pôle  $\left( \frac{L_d}{R_s} \right)$  par  $\left( \frac{K_p}{K_i} \right)$  ce qui se traduit par la condition :

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_p}{K_i}$$

Les fonctions de transfert en boucle ouverte et fermée seront :

$$\left\{ \begin{array}{l} FTBO(p)_{id} = \frac{K_{id}}{P R_s} \\ FTBF(p)_{id} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{K_{id}} \cdot P} \end{array} \right. \quad (\text{II.26})$$

La constante de temps de l'axe  $d$  de la machine est :  $\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}}$

Supposons que le temps de réponse  $T_r$  sera égale à :  $T_r = 3 * \tau_d$



Les gains du régulateur PI pour un temps de réponse donné seront calculés comme suit :

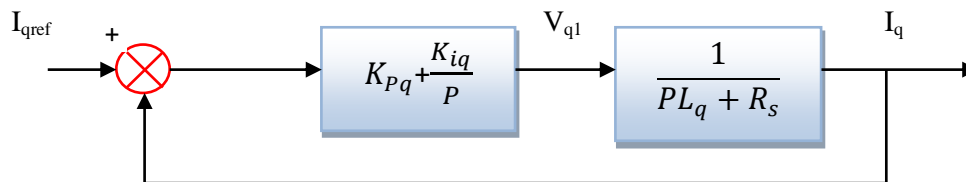
$$\begin{cases} T_r = 3 * \frac{R_s}{K_{id}} \\ \frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Donc :

$$\begin{cases} K_{pd} = 3 * \frac{R_s}{T_r} \\ K_{pi} = 3 * \frac{L_d}{T_r} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

### II.6.1.2. Régulateur de courant $I_q$

La boucle de régulation sur l'axe q est présentée par la figure suivante :



**Fig.II.11.** Boucle de régulation du courant  $I_q$

Pour la régulation du courant  $I_q$ , on suit la même procédure utilisée pour la régulation du courant  $I_d$ . Les gains du régulateur PI pour un temps de réponse donné seront calculés comme suit :

$$\begin{cases} T_r = 3 * \frac{R_s}{K_{iq}} \\ \frac{L_q}{R_p} = \frac{K_{pq}}{K_{iq}} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Donc :

$$\begin{cases} K_{iq} = 3 * \frac{R_s}{T_r} \\ K_{pq} = 3 * \frac{L_q}{T_r} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

### II.6.1.3. Régulateur de la vitesse

Le régulateur de vitesse permet la détermination du couple de référence afin de maintenir la vitesse constante. En insérant un régulateur PI dans la boucle de vitesse on obtient le schéma de la figure suivante :

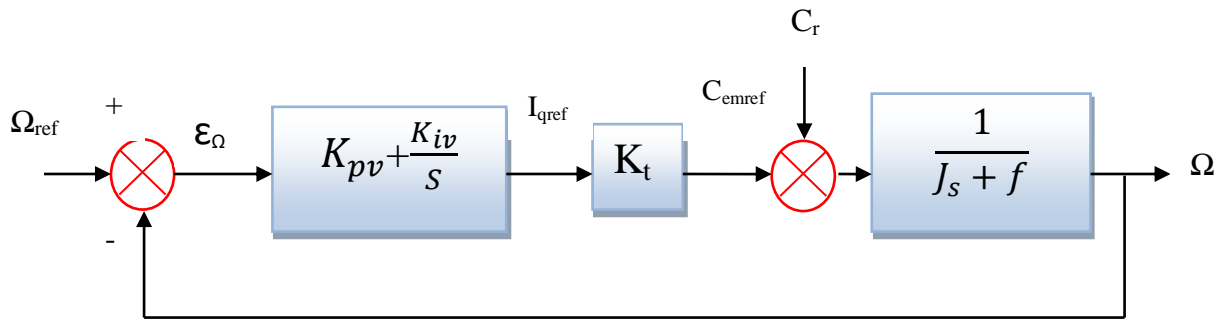


Fig.II.12. Boucle de régulation de vitesse

## II.7. Modélisation de convertisseur statique

Après avoir présenté le modèle de la machine, on présentera le système d'entraînement complet où la machine synchrone est associée à un convertisseur DC/AC.

Les onduleurs tiennent une place importante dans les entraînements de vitesse des moteurs électriques. L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif, il permet d'imposer aux bornes de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. On distingue plusieurs types d'onduleurs [2] :

- ❖ Selon la source :
  - Onduleurs de tension.
  - Onduleurs de courant.
- ❖ Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.).
- ❖ Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.).

Néanmoins, plusieurs problèmes se posent, particulièrement celui de l'apparition des harmoniques d'ordre supérieur. Ces harmoniques ont un effet indésirable sur le comportement dynamique de la machine ; elles nuisent le fonctionnement normal de la machine. En effet, la présence de ces harmoniques entraîne des couples pulsatives indésirables, ainsi que des pertes supplémentaires.

### II.7.1. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances [27].

### II.7.1.1. Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

#### II.7.1.1.a. Onduleur autonome

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes la charge est quelconque cet onduleur n'est pas réversible.

#### II.7.1.1.b. Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est « naturelle » contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

### II.7.2. Onduleur de tension

Un onduleur de tension triphasé dont les composants semi-conducteurs contrôlables sont des transistors ou des thyristor GTO, est le cœur de l'organe de commande du MSAP. Il peut être considéré comme un amplificateur de puissance, et il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Chaque interrupteur est monté en parallèle inverse avec une diode de récupération. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source, les interrupteurs K1 et K4, K2 et K5, K3 et K6 doivent être contrôlés de manière complémentaire [29]. Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique alimentant le stator du MSAP est illustré par Fig (II.13).

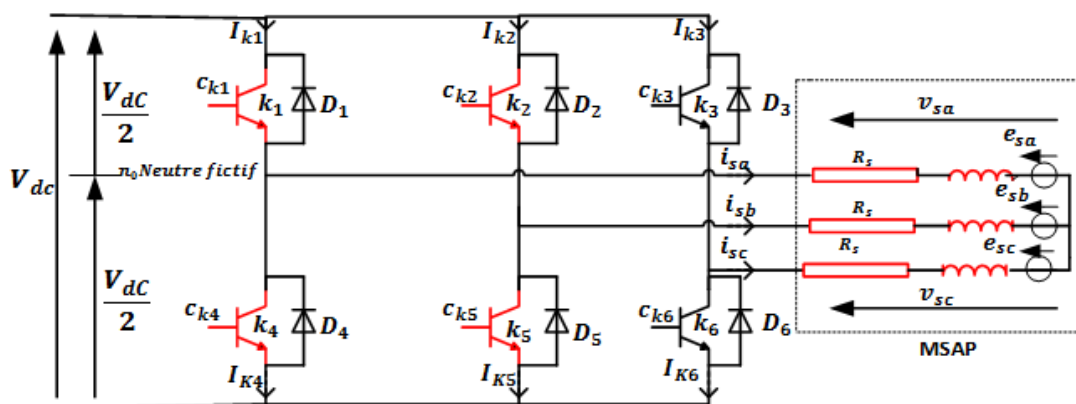


Fig.II.13.Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le stator du MSAP

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée.

Sachant que dans un régime équilibré  $V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0$  nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} + V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} + V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En faisant la somme des équations (II.15) on obtient :

$$V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=V_{ao}+V_{bo}+V_{co}+3V_{on}=0$$

D'où :

$$V_{ao}+V_{bo}+V_{co}= -3V_{on} \quad (\text{II.32})$$

Donc :

$$V_{on}= -\frac{1}{3}(V_{ao}+V_{bo}+V_{co}) \quad (\text{II.33})$$

En remplaçant (II.33) dans (II.31):

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} - \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \\ V_{bn} = V_{bo} - \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \\ V_{cn} = V_{co} - \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Donc nous avons le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Les deux interrupteurs de chaque branche de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire, en appliquant une modulation de largeur d'impulsion.

A partir du schéma de l'onduleur, les tensions fournies par les demi-ponts sont:

$$V_i - V_o = \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K_i : \text{ fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K_i : \text{ ouvert} \end{cases} \quad \text{avec } i=a,b,c \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Avec :  $S_i$  est l'état de l'interrupteur  $K_i$ , supposé parfait, tel que pour le  $i^{\text{ème}}$  bras de l'onduleur ( $i=a, b, c$ ) :

- $S_i=1$  si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert.
- $S_i=0$  si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé.

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions le plus sinusoïdales possible, à cet effet, différentes méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs d'un onduleur. La stratégie la plus utilisée est la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI).

## II.8. Onduleur de Tension à MLI

La modulation de largeurs d'impulsions (MLI) est une technique de commande qui permet d'une part de réduire les harmoniques de tension et d'autre part de contrôler son amplitude. La MLI consiste à multiplier le nombre des commutations des interrupteurs de l'onduleur, en gardant la tension d'entrée continue fixe, et en variant les largeurs des impulsions de la tension. Il existe plusieurs stratégies de modulation de largeur d'impulsions:

- MLI triangulé-sinusoïdale,
- MLI vectorielle . . . etc.

Chacune d'elle doit obéir à un algorithme bien défini, mais toutes sont conçues pour générer une source de tension la plus sinusoïdale possible à la sortie de l'onduleur [3].

### II.8.1.MLI Sinus-Triangle

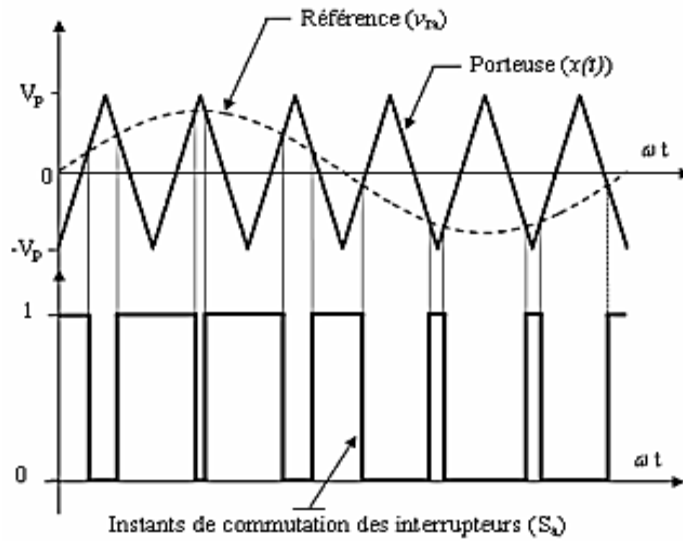
Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI (modulation de largeur d'impulsion), qui consiste à comparer le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence, à un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée. Le signal module est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [33].

Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

- Le deuxième appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur [2]. C'est un signal de haute fréquence  $f_p$  par rapport au signal de référence de fréquence  $f$  tel que :  $f_p \gg f$

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs (Fig.II.14).



**Fig.II.14.** Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

$$m = \frac{f_p}{f_r}$$

Avec :

$m$  : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence  $f_p$  de la porteuse et la fréquence  $f_r$  de la référence.

$$r = \frac{V_r}{V_p}$$

Où :

$r$  : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante  $V_r$  à la valeur crête  $V_p$  de la porteuse.

### II.8.2.MLI Vectorielle

Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension possède six cellules de commutation, donnant huit configurations possibles. Ces huit états de commutation peuvent s'exprimer dans le plan  $(\alpha, \beta)$  par huit vecteurs de tension notés  $V_0, V_7$  de à ; parmi ces vecteurs, deux sont nuls, les autres étant répartis régulièrement à tous les  $60^\circ$ . Le principe de MLI vectorielle consiste à projeter le vecteur  $V_s$  de tension statorique désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant à deux états de commutation de l'onduleur. Les valeurs de ces projections, assurant le calcul des temps de commutations désirées, correspondent à deux états non nuls de commutation de l'onduleur. Si nous notons  $T_i$  et  $T_{i+1}$ , et ces deux temps, leur

somme doit être inférieure à la période  $T_s$  de commutation de l'onduleur. Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué durant une durée complémentaire à  $T_s$  [28].

A partir l'équation (II.37) et appliquons la transformation triphasé/biphasé respectant le transfert de puissance :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs de l'onduleur permet de calculer les composantes du vecteur de tension  $\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix}$ . Nous pouvons donc dresser un tableau, qui synthétise les différents états de l'onduleur Tab (II.1).

Vecteur	Etats des grandeurs Booléennes de commande			Tensions simples			Tensions biphasées	
	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{s\alpha}$	$V_{s\beta}$
$\vec{V}_0$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\vec{V}_5$	0	0	1	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}V_{dc}$
$\vec{V}_3$	0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}V_{dc}$
$\vec{V}_4$	0	1	1	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$	0
$\vec{V}_1$	1	0	0	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$	0
$\vec{V}_6$	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}V_{dc}$
$\vec{V}_2$	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{6}}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}V_{dc}$
$\vec{V}_7$	1	1	1	0	0	0	0	0

**Tableau II.1.** Tensions simples, et biphasées

Les huit vecteurs de tensions redéfinies par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan  $(\alpha, \beta)$  par la figure (II.15):

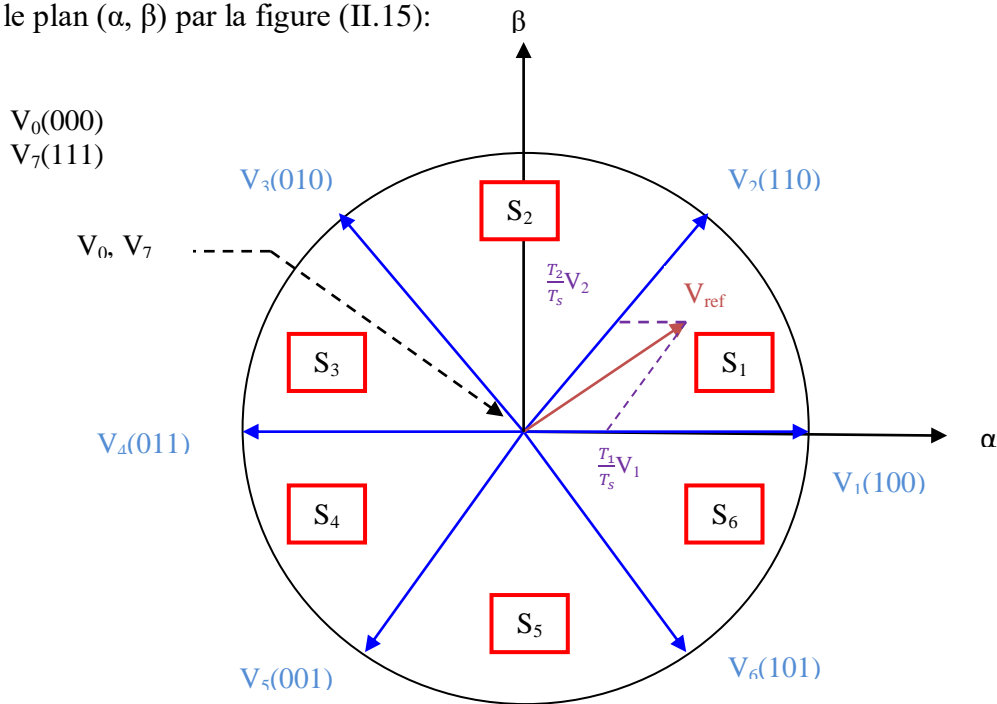


Fig. II.15. Représentation des vecteurs de tensions dans le repère  $(\alpha, \beta)$

## II.9. Dynamique de véhicule

### II.9.1. Description du modèle

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui rend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Six forces agissent sur un véhicule en mouvement. Elles sont chacune responsables d'une partie de la consommation. En comprenant comment elles agissent, vous pouvez limiter leur impact [2] [30].

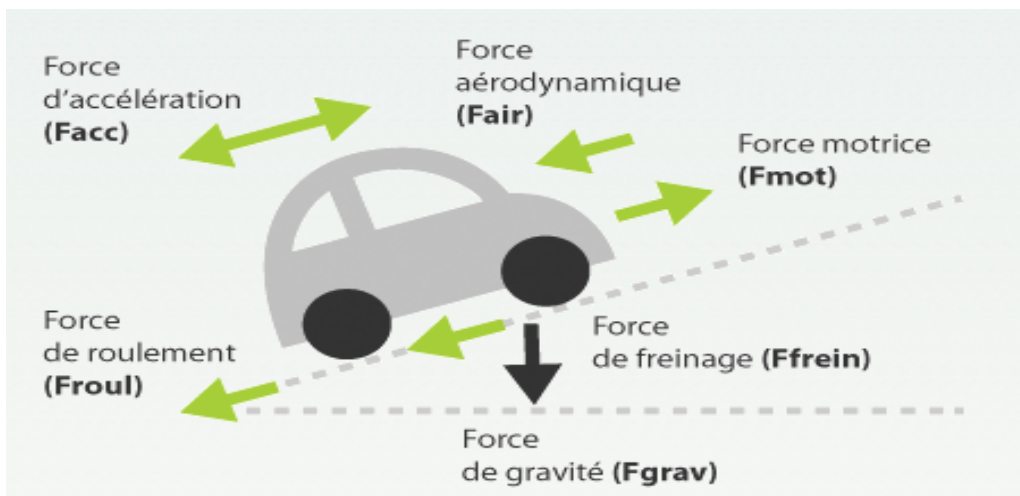


Fig. II.16. Les forces agissant sur un véhicule



$$F_{mot} = F_{air} + F_{acc} + F_{roul} + F_{grav} + F_{frein}$$

## II.9.2. Le modèle dynamique du véhicule

- L'appliquant de deuxième loi de Newton nous donne :

$$F_{tot} - F_R = M \frac{dV_{veh}}{dt} \quad (II.39)$$

Où :

$V$  : la vitesse du véhicule.

$F_{tot}$  : l'effort de traction totale du véhicule

$F_R$  : la résistance totale

$M$  : la masse totale du véhicule.

- L'effort total de traction d'un véhicule peut se décomposer en :

$$F_{tot} = F_r + F_a + F_g + F_{fr\acute{e}} + F_{acc} \quad (II.40)$$

Où :

$F_r$  : force de résistance de roulement des roues.

$F_a$  : force aérodynamique.

$F_g$  : force de gravité.

$F_{acc}$  : force d'accélération.

### II.9.2.1. Force de roulement

La force de roulement agit au niveau des pneus et s'oppose au mouvement libre du véhicule. La force de résistance de roulement  $F_r$  est produite par le pneu au contact de la surface de la chaussée, elle est liée au coefficient de roulement des roues. Pratiquement ce coefficient de roulement  $C_{rr}$  vaut environ 0.01, il dépend de la largeur des pneus et du revêtement routier [30].

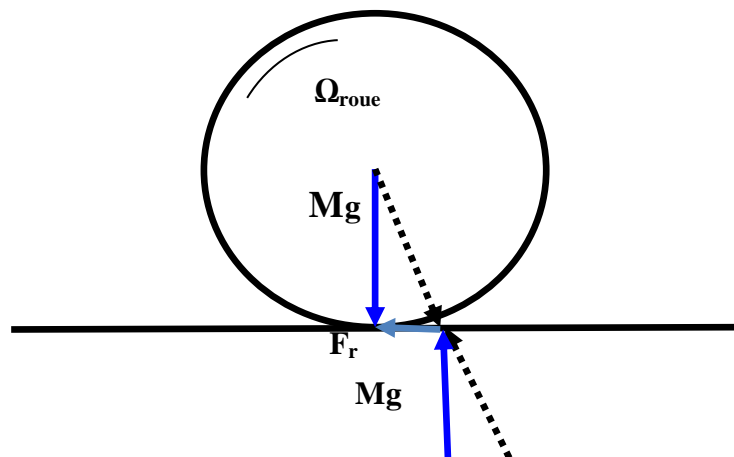


Fig. II.17. La force de roulement sur la roue

$$F_r = (C_{rr} m_{av} + C_{rr} m_{ar})g \cos \alpha = M g C_{rr} \cos \alpha \quad (\text{II.41})$$

Où :

$m_{av}$  et  $m_{ar}$  : les masses portées par les roues avant et arrière.

$M$  : La masse totale véhicule.

$\alpha$ : l'angle de pente en *rad*

### II.9.2.2. Force aérodynamique

La force aérodynamique est la résistance que l'air exerce sur un véhicule en mouvement, est proportionnelle à la masse volumique de l'air. Il s'agit de la force ressentie sur votre main lorsque vous la sortez par la fenêtre de votre véhicule [2].

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_x (V_{véh} - V_{vent})^2 \quad (\text{II.42})$$

$\rho_{air}$ : densité volumique de l'air, en générale pris égal à 1,23(kg/m3).

$S_f$ : section frontale du véhicule.

$V_{véh}$ : vitesse du véhicule.

$V_{vent}$  : vitesse du vent.

$C_x$ : coefficient de pénétration dans l'air

### II.9.2.3. Force de gravité

Force de gravité quand le véhicule circule sur une route non horizontale

$$F_g = M g \sin (\alpha_p) \quad (\text{II.43})$$

Où :  $\alpha_p$ : l'angle de la pente.

### II.9.2.4. Force de freinage

Le freinage est un système qui récupère l'énergie au freinage sur les véhicules hybrides et électriques. Il permet de recharger la batterie tout en conduisant et augmente l'autonomie du véhicule. Quand ce dernier atteint sa limite de charge maximale ou que la machine électrique atteint son couple minimal par exemple, le frein mécanique prend le relais pour décélérer ou arrêter le véhicule [31].

### II.9.2.5. Force d'accélération

La force d'accélération, parfois appelée la force d'inertie, est la résistance du véhicule aux variations de vitesse. La force due à l'accélération  $F_{acc}$  assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur, cette force est obtenue par le produit entre la masse de véhicule et l'accélération imposée par le conducteur [6].

$$F_{acc} = M \frac{dV}{dt} = M \gamma \quad (\text{II.44})$$

Avec :

$\gamma$  : L'accélération de véhicule.

-La puissance à fournir aux roues en fonction de la vitesse du déplacement est donnée par l'expression suivante :

$$P = F_{tot}V \quad (\text{II.45})$$

-Le couple de traction total est lié à la force de traction par la relation :

$$C_{tot} = F_{tot}R \quad (\text{II.46})$$

Où :  $R$  : Rayon de la roue.

- Le couple résistant appliqué au véhicule s'écrit :

$$C_r = F_R R \quad (\text{II.47})$$

Avec :  $F_R = F_r + F_a + F_g$       Où :  $F_R$  : La force de résistance totale.

- La vitesse angulaire des roues  $w$  (roues) est liée à la vitesse du véhicule  $V$  par la relation

$$w_{(roue)} = \frac{V}{R} \quad (\text{II.48})$$

- En appliquant le principe fondamental de la dynamique

$$F_{tot}(t) - F_R(t) = M \frac{dV_{véh}(t)}{dt}$$

$$V_{véh} = \frac{1}{M} \int_0^t (F_{tot}(t) - F_a(t) - F_g(t) - F_r(t)) dt \quad (\text{II.49})$$

## II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un modèle dynamique du véhicule électrique toute en montrant la non linéarité due au couplage entre certains paramètres. Suivi, de la présentation de tension MLI assurant l'alimentation de la partie traction ou MSAP. L'introduction de la commande vectorielle afin de découpler les paramètres afin de rendre le comportement du couple de la machine considéré, similaire à celui d'un moteur à courant continu. Le réglage de la vitesse avec un régulateur classique (PI) a permis d'obtenir des performances dynamiques et statiques satisfaisantes. Cependant, la synthèse du réglage par des régulateur PI, a été effectuée après linéarisation du système en adoptant la technique du découplage par compensation suite à non linéarité du system. Pour cala, on a proposé une commande intelligente basée sur l'utilisation de la logique floue afin d'améliorer les performances du système en terme de rapidité et précision qui sera abordée en détails dans le chapitre suivant.

# *CHAPITRE III*

*Commande non linéaire du véhicule  
électrique*

### III.1.Introduction

La commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants (telles que les machines électriques) par les lois de commandes classiques applicables aux systèmes linéaires peut être insuffisante car elles sont non robuste surtout lorsque les exigences sur la précision, la rapidité, rejet de perturbations et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes.

L'appel à des lois de commandes insensibles aux variations des paramètres, aux dynamiques négligées, aux perturbations et aux non linéarités intrinsèques du système s'avère nécessaire. Dans cet objectif, plusieurs outils sont proposés dans la littérature dont on cite l'utilisation de la géométrie différentielle pour la linéarisation des systèmes, la commande à structure variable, la commande adaptative et la commande par mode glissant etc...

Le réglage par la logique floue est insensible aux variations des paramètres, aux dynamiques négligées, aux perturbations et aux non linéarités intrinsèques du système. Dans cette vision, on traite dans ce chapitre l'application de la logique floue pour la régulation de vitesse de la MSAP en utilisant des régulateurs flous de type Mamdani.

### III.2. Historique et Principe de la logique floue

La logique floue (fuzzy logic, en anglais) est de grande actualité aujourd'hui. En réalité elle existait déjà depuis longtemps et nous pouvons diviser son histoire de développement en trois étapes. Ce sont les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg qui ont conduit au développement de la "logique d valeurs multiples" ou "logique floue" dans les années 1920 et 1930. En 1937, le philosophe Max Black a appliqué la logique continue, qui se base sur l'échelle des valeurs vraies (0, 1/2, 1) pour classer les éléments ou symboles. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lofti Zadeh [35].

Cette approche fait partie des méthodologies intelligentes, elle est inspirée de la capacité de l'homme à prendre des décisions et agir de façon convenable malgré le flou (l'incertitude) des connaissances disponibles. Elle a été introduite dans le but d'approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances telles que la base des règles et les fonctions d'appartenance, qui sont construites par l'introduction des informations linguistiques et numériques fournies par l'expert humain [36]. Les premières applications de la logique floue étaient confinées dans des domaines non techniques, comme le commerce et la gestion, et ce n'est qu'en 1974 qu'elle s'est appliquée en automatique par E. H. Mamdani qui a commencé par la réalisation du premier contrôleur flou.

Ainsi il s'est intéressé aux règles floues reposant sur la représentation de savoir des experts pour décrire l'état du système et eut ainsi l'idée d'élargir la notion d'appartenance normalement traduites par « oui » ou « non » aux critères « peut-être » , « sans doute » ..etc. Il a ainsi fixé la notion de sous-ensembles et il a fourni le point de départ d'une nouvelle théorie [37].

### III.2.1. Ensembles flous et variables linguistiques

Dans la théorie des ensembles conventionnels, une chose appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble. Toutefois, dans la réalité, il est rare de rencontrer des choses dont le statut est précisément défini. Par exemple, où est exactement la différence entre une personne grande et une autre de grandeur moyenne? C'est partir de ce genre de constatation que Zadeh a développé sa théorie. Il a défini les ensembles flous comme étant des termes Linguistiques du genre: zéro, grand, négatif, petit ... Ces termes existent aussi dans les ensembles conventionnels. Cependant, ce qui différencie ces deux théories sur les ensembles provient des limites des ensembles. Dans les ensembles flous, Il est permis qu'une chose appartienne partiellement à un certain ensemble; ceci s'appelle le degré d'appartenance. Dans les ensembles conventionnels, le degré d'appartenance est 0 ou 1 alors que dans la théorie des ensembles flous, le degré d'appartenance peut varier entre 0 et 1 [38].

Un ensemble flou est défini comme suit : soit S un ensemble et X un membre de cet ensemble. Un sous-ensemble flou F de S est défini par une fonction d'appartenance  $\mu_F(x)$  qui mesure le degré auquel x appartient à F.

Un ensemble flou A peut également être décrit par un certain nombre de caractéristiques Comme [39] :

- **Son support** : qui est l'ensemble des éléments de  $U$  qui appartiennent au moins un peu à A .Il est défini par :

$$\text{Supp}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) > 0\} \quad (\text{III.1})$$

- **Sa hauteur** : qui est sa plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance. Elle est défini par :

$$h(A) = \sup_{x \in U} \mu_A(x) \quad (\text{III.2})$$

- **Son noyau** : qui est l'ensemble des éléments de  $U$  pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1. Il est défini par :

$$\text{noy}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{III.3})$$

### III.2.2. Différentes formes pour les fonctions d'appartenance

Les formes les plus couramment utilisées pour les fonctions d'appartenance sont les formes triangulaires, trapézoïdales ou Gaussiennes.

- Fonction d'appartenance trapézoïdale :

$$\mu(x) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right)\right) \quad (\text{III.4})$$

Où a, b, c et d sont les coordonnées des apex du trapèze.

- Fonction d'appartenance triangulaire :

$$\mu(x) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right)\right) \quad (\text{III.5})$$

Où a, b, c sont les coordonnées des apex du triangle.

- Fonction d'appartenance gaussienne :

$$\mu(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-c}{2\sigma}\right)^2\right) \quad (\text{III.6})$$

Où c est le centre de la gaussienne et  $\sigma$  sa largeur (variance).

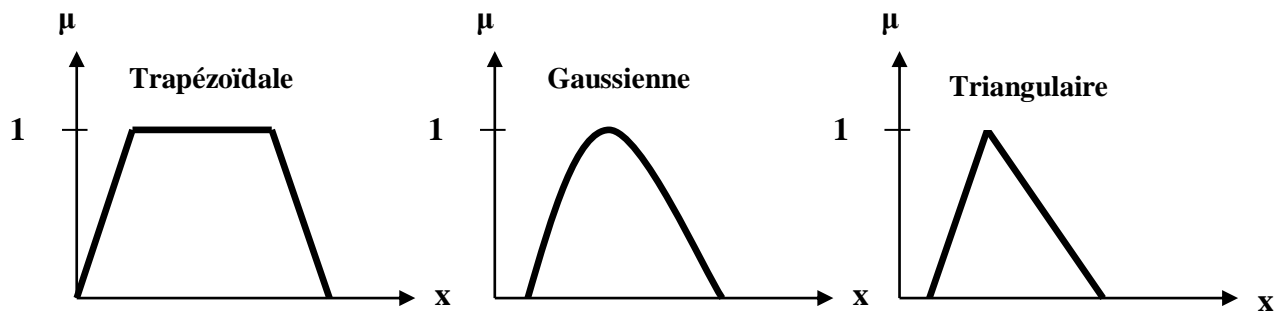


Fig. III.1. Différentes formes des fonctions d'appartenance.

### III.2.3. Opérateur de la logique floue

Les mathématiques élaborées à partir des ensembles flous ressemblent beaucoup à celles reliées à la théorie des ensembles conventionnels. Les opérateurs d'union, d'intersection et de négation existent pour les deux types d'ensemble. Les opérateurs habituels, soit l'addition, la soustraction, la division et la multiplication de deux ou plusieurs ensembles flous existent aussi. Toutefois, ce sont les deux opérateurs d'union et d'intersection qu'on utilise le plus souvent dans la commande par la logique floue.

On définit l'intersection ou l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou. Ces relations sont traduites par les opérateurs 'ET', 'OU' et 'NON'. De nouvelles fonctions d'appartenance liées à ces opérateurs sont établies.

- **Opérateur ET (Intersection floue) :**

La fonction d'appartenance  $\mu_{A \cap B}$  pour l'ensemble flou  $A \cap B$  est définie comme suit :

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (\text{III.7})$$

- **Opérateur OU (Union floue) :**

La fonction d'appartenance  $\mu_{A \cup B}$  pour l'ensemble flou  $A \cup B$  est définie comme suit :

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (\text{III.8})$$

- **Opérateur NON (complémentation floue) :**

On définit la fonction d'appartenance  $\mu_{\bar{A}}$  pour l'ensemble flou  $\bar{A}$  par :

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (\text{III.9})$$

La figure III.2 résume ces opérations, de façon graphique.

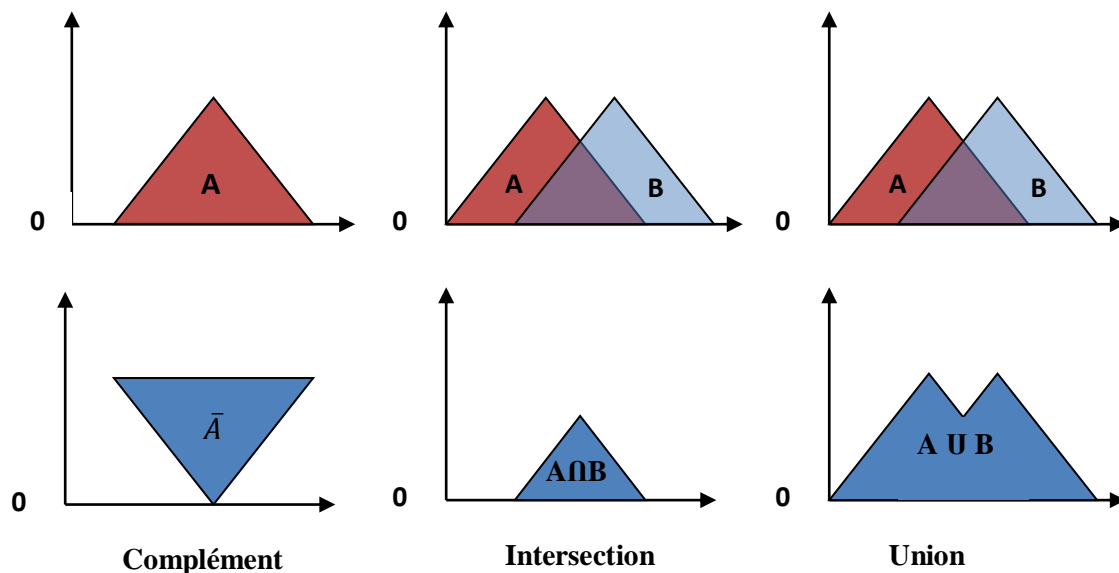


Fig. III.2. Exemple d'opérations sur des ensembles flous.

### III.2.4. Commande par logique floue

La commande par logique floue (CLF) est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire connaître des modèles mathématiques des systèmes à commander. Le régulateur flou utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques [1]. L'avis essentiel de la commande logique floue est la règle de la commande linguistique. Qui peut prendre plusieurs formes. Cependant, elle indique invariablement quelle action de commande prendre face à une condition donnée. Cette condition peut être une diminution ou augmentation de la grandeur à régler, comme par exemple le cas du réglage de la vitesse d'une machine électrique [40].



### III.2.4.1. Structure générale d'un contrôleur flou

La commande ou la régulation des systèmes est le domaine industriel de la logique floue le plus exploité. On distingue trois structures majeures de régulateurs à logique floue,

- La structure pure ;
- La structure de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) ;
- La structure de Mamdani ou le modèle « fuzzification - defuzzification ».

Le fuzzificateur transforme les variables réelles d'entrée en variables linguistiques floues, tandis que le défuzzificateur effectue l'opération inverse. La structure de Mamdani est devenue le modèle standard du RLF le plus utilisé dans la régulation des systèmes [41].

L'architecture de Mamdani est constituée de quatre parties essentielles à savoir :

- L'interface de fuzzification (le fuzzificateur) ;
- La base de connaissance ;
- Le mécanisme d'inférence ou l'évaluation de règles ;
- L'interface de défuzzification (le défuzzificateur)

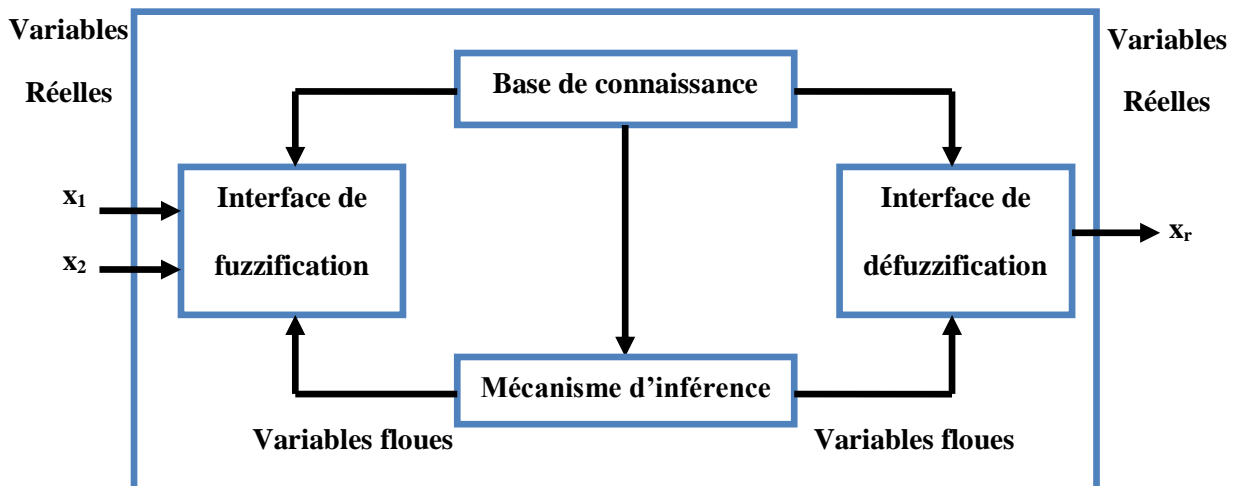


Fig. III.3. Structure de base du régulateur

#### III.2.4.1.1. L'interface de fuzzification :

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Mesurer les valeurs numériques des variables d'entrées ;
- Représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- Rendre une entrée classique en valeur linguistique. Des valeurs d'entrée sont traduites en concepts linguistiques représentés comme des ensembles flous [36].

### III.2.4.1.2. La base de connaissance :

Elle contient les informations du domaine d'application et du contrôle. Il consiste en «base de données » et en « base de règles» [37] [40]:

- **Base de données** : fournissant les définitions nécessaires utilisées pour définir les règles de contrôle linguistique et la manipulation de données floues dans le contrôleur
- **Base de règles** : Elle caractérise le but et la politique du contrôle flou via un ensemble de règle de contrôle flou. Et elle est représentée sous forme de règles :

$$R1 : \text{SI } x_1 \text{ est } A_1 \text{ et...et } x_n \text{ est } A_n \text{ ALORS } u_1 \text{ est } B_1$$

Avec :  $[x_1, \dots, x_n]$  : les entrées du régulateur et  $u_1$  : la sortie du régulateur.

### III.2.4.1.3. Bloc inférence :

Ce bloc représente le noyau du contrôleur flou, qui est capable de simuler les décisions humaines basées sur le concept flou et d'inférer les actions de contrôle flou par intervention de l'implication floue et des règles d'inférence. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement [40] :

- La méthode d'inférence max-min (Mamdani) ;
- La méthode d'inférence max-produit (Larsen) ;
- La méthode d'inférence somme-produit (Sugeno).

### III.2.4.1.4. Défuzzification

La défuzzification définit la loi de commande du régulateur flou, elle réalise donc la conversion inverse de la fuzzification (conversion digitale/analogique).elle permet de générer une valeur numérique à partir de l'ensemble obtenue par composition des règles. Dans la commande en temps réel, un critère de choix de la commande de défuzzification est la simplicité de calcul. Il existe plusieurs stratégies de défuzzification dont les plus utilisées sont [40]:

- Méthode du maximum ;
  - Méthode de la moyenne des maximums ;
  - Méthode du centre de gravité ;
  - Méthode des hauteurs pondérées.
- ❖ **Méthode du maximum** : Cette méthode, s'applique uniquement dans le cas où la fonction d'appartenance associée à l'ensemble de sortie n'admet qu'un seul maximum. On choisit comme sortie l'abscisse  $u_r$  correspondant à ce maximum [39] :

$$\mu_A(u_r) = \max(\mu_A(u)) \quad (\text{III.10})$$

Dans le cas général :  $\mu_A(u_r)$  est indéterminé lorsqu'il existe plusieurs points qui maximisent  $\mu_A(u)$ . Pour cette raison on fait appel à la méthode des maximums.

- ❖ **Méthode de la moyenne des maximums :** Dans cette méthode, la valeur de sortie est estimée par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle M pour lequel la fonction d'appartenance est maximale. Cette valeur est fournie par l'expression [39] :

$$u_r = (\inf(M) + \sup(M))/2 \quad (\text{III.11})$$

Où  $\inf(M)$  et  $\sup(M)$  sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle M.

- ❖ **Méthode du centre de gravité :** Cette méthode donne généralement de meilleurs résultats malgré l'exigence d'une grande puissance de calcul. Elle consiste à calculer l'abscisse le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{RES}$  de la phase de composition selon :

Dans le cas discret :

$$u_r = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu_{RES}(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{RES}(u_i)} \quad (\text{III.12})$$

n : Le nombre des niveaux de la sortie du contrôleur flou.

Dans le cas continu:

$$u_r = \frac{\int u \cdot \mu_{RES}(u) du}{\int \mu_{RES}(u) du} \quad (\text{III.13})$$

- ❖ **Méthode des hauteurs pondérées :** Cette méthode consiste à calculer la sortie du contrôleur en utilisant les centres de gravité  $u_i^*$  de chacun des ensembles  $C_i$ . [40].

$$u_r = \frac{\sum_{i=1}^m u_i^* \mu_{C_i}(u_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{C_i}(u_i)} \quad (\text{III.14})$$

Où m : est le nombre d'ensembles flous associés à la variable de sortie  $u_r$ .

### III.2.4.2. Différentes approches pour la détermination des règles

Il existe deux approches principales pour la détermination des règles d'un contrôleur flou. La première est une méthode purement heuristique; les règles sont déterminées de telle sorte que l'écart entre la consigne et la sortie puisse être corrigée. Cette détermination repose sur la connaissance qualitative du comportement du processus. La seconde approche est une méthode pouvant déterminer d'une manière systématique la structure linguistique et/ou les paramètres satisfaisants les objectifs et les contraintes de contrôle.

Une autre méthode a été introduite pour la détermination des règles et cela en se référant à la trajectoire du système en boucle fermée. La recherche intuitive du comportement du système en boucle fermée, pour la détermination des règles dans le domaine temporel, utilise fréquemment l'erreur  $e$  (observation) et la variation de l'erreur  $\Delta e$ . (dynamique du processus) ainsi que la variation de la commande  $\Delta U$  (entrée du processus à réguler).

La procédure à suivre, pour la détermination des règles du contrôleur flou est expliquée en considérant les points indiqués sur la figure (III.4). Pour chacun de ces points, on explicite l'expertise sous la forme suivante [3] :

Règle 1: Si  $e=PG$  et  $\Delta e=EZ$  alors  $\Delta U=PG$ . Départ.

Règle 2: Si  $e=PG$  et  $\Delta e=NP$  alors  $\Delta U =PM$ . Augmentation de la commande pour garder l'équilibre.

Règle 3: Si  $e=PM$  et  $\Delta e =NP$  alors  $\Delta U =PP$ . Très faible augmentation de la commande pour ne pas dépasser la valeur limite.

Règle 4: Si  $e=PP$  et  $\Delta e=NP$  alors  $\Delta U=EZ$ . Convergence vers l'équilibre.

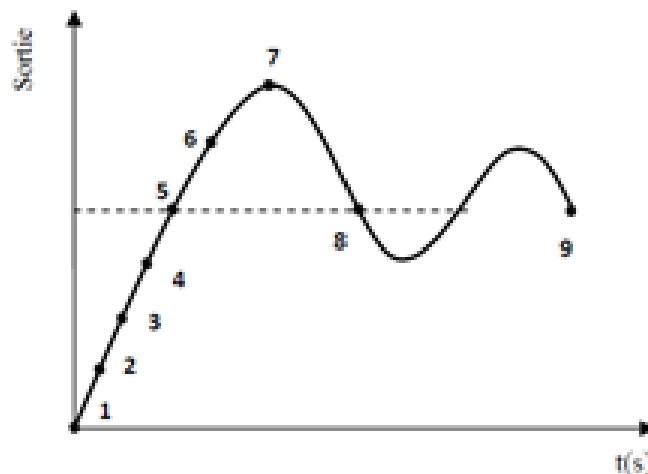
Règle 5: Si  $e=EZ$  et  $\Delta e=NP$  alors  $\Delta U=NP$ . Freinage du processus.

Règle 6: Si  $e=NP$  et  $\Delta e=PP$  alors  $\Delta U =NM$ . Freinage et inversion de la variation de la commande.

Règle 7: Si  $e=NM$  et  $\Delta e=EZ$  alors  $\Delta U=NM$ . Rappel du processus vers l'équilibre.

Règle 8: Si  $e=NP$  et  $\Delta e=EZ$  alors  $\Delta U=EZ$ . Convergence vers l'équilibre.

Règle 9: Si  $e=EZ$  et  $\Delta e=EZ$  alors  $\Delta U=EZ$ . Equilibre.



**Fig. III.4.** Ecriture de jeu de règles à l'aide d'une analyse temporelle

**Les règles :**

1. Si (E = N) ET (de = N) ALORS (du = N)
2. Si (E = N) ET (de = z) ALORS (du = N)
3. Si (E = N) ET (de = p) ALORS (du = z)
4. Si (E = z) ET (de = N) ALORS (du = N)
5. Si (E = z) ET (de = z) ALORS (du = z)
6. Si (E = z) ET (de = p) ALORS (du = p)
7. Si (E = p) ET (de = N) ALORS (du = z)
8. Si (E = p) ET (de = z) ALORS (du = p)
9. Si (E = p) ET (de = p) ALORS (du = p)

**III.3. Comparaison avec la logique classique**

La logique classique est un cas particulier de la logique floue. Autrement dit, la logique floue est une extension de la logique classique. La logique classique est un pan des mathématiques relativement bien connu du public. En ce logique les décisions sont binaires : soit vraies, soient fausses. En logique floue, une décision peut être à la fois vraie et fausse en même temps, avec un certain degré d'appartenance à chacune de ces deux croyances [38] [42].

**III.4. Avantages et inconvénients de la commande par logique floue****✚ Avantages [43]**

Les avantages principaux des régulateurs flous sont les suivants :

- ✓ L'incorporation directe des informations floues et linguistiques, provenant d'un expert humain, dans le système flou.
- ✓ Il n'y a pas nécessaire de faire un modèle mathématique du système à régler.
- ✓ Le système flou est une approximation universel, c'est-à-dire, il est suffisamment générale pour générer n'importe quelle action.
- ✓ La logique floue est facile à comprendre par ceux qui ne sont pas des spécialistes, car elle imite la stratégie du raisonnement humain.
- ✓ On peut maîtriser les systèmes non linéaires et difficiles à modéliser.
- ✓ La logique floue s'adapte à la régulation de processus aussi bien linéaire que non linéaire.

**✚ Inconvénients [42]**

- ✓ Manque de directives précises pour la conception d'un régulateur,
- ✓ Précision de réglage en général peu élevé.

- ✓ Cette méthode ne peut pas garantir que le système soit stable, précis ou optimal, ni même qu'elle ne peut garantir que les règles entrées par le programmeur ne soient pas contradictoires.
- ✓ Les performances sont mesurées a posteriori et ne peuvent être calculées a priori. Les réglages se font donc par essais/erreurs.

### III.5. Application du régulateur flou pour la commande de la MSAP

On considère un ensemble de stratégies de contrôle reposant sur l'erreur entre une consigne prédéterminée de la vitesse et de la sortie réelle du système qui est la vitesse de rotation de la machine d'une part et de la variation de cette erreur d'autre part.

Les entrées du régulateur flou sont donc :

- ✓ La vitesse de rotation de la machine ;
- ✓ La référence de la vitesse.

#### III.5.1. Le choix des variables d'entrée et de sortie :

Pour le réglage de la machine synchrone à aimants permanents, nous avons choisi comme variables d'entrées l'erreur  $\varepsilon$  qui est la différence entre la vitesse de référence  $\omega^*$  imposée par l'opérateur, et la vitesse de rotation du rotor de la machine ( $\varepsilon = \omega^* - \omega$ ). L'autre variable d'entrée est la dérivée de l'erreur qui représente la différence entre l'erreur actuelle et l'erreur précédente ( $\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0$ ). Comme variable de sortie une seule variable de commande qui est le couple de référence ( $C_{em}^*$ ) est choisie .

#### III.5.2. Normalisation des variables d'entrées et de sortie :

La normalisation se fait par une division des variables  $\varepsilon$ ,  $\Delta\varepsilon$ ,  $C_{em}^*$  respectivement par les coefficients  $K_\varepsilon$ ,  $K_{\Delta\varepsilon}$ ,  $K_{C_{em}^*}$  de telle sorte qu'elles travaillent dans le domaine [-100 100] pour la variation de la vitesse, dans l'intervalle [-200 200] pour la variation du couple et dans l'intervalle [-1 1] pour la variation du flux.

#### III.5.3. Interface de fuzzification :

D'autre part, la fuzzification consiste à choisir la forme des fonctions d'appartenance. Pour une raison de simplification et en vue d'avoir le même effet de réglage dans les sens de rotation, les fonctions d'appartenance de forme triangulaire avec intersection de 50% placées symétriquement par rapport à zéro sont utilisées. Le nombre des ensembles flous est trois pour toutes les variables linguistiques qui sont successivement notées :

N : Négatif ; Z : Zéro ; P : Positif

### III.5.4. Choix de la méthode d'inférence :

Après avoir choisi les règles d'inférence, les opérateurs de la logique floue permettent de choisir une méthode pour le traitement de l'inférence. Sachant que l'opérateur ET est le minimum, l'opérateur OU est le maximum et l'opérateur ALORS est le maximum. la méthode retenue sera la méthode min/max.

L'inférence est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence, les règles d'inférence utilisées sont de type :

$$\text{Si } \varepsilon \text{ est } x_1 \text{ ET } \Delta\varepsilon \text{ est } x_2 \text{ ALORS } C_{em}^* \text{ est } x_3$$

### III.5.5. Base de connaissances :

On a deux entrées, chaque entrée ( $\varepsilon$  et  $\Delta\varepsilon$ ) est représentée par trois ensembles flous, donc neuf combinaisons possibles, ce qui mène à neuf règles floues. Ces règles sont représentées dans une matrice dite « matrice d'inférence » selon le tableau (III.1).

$\Delta\varepsilon \backslash \varepsilon$	N	Z	P
N	N	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	P

**Tableau III.1.** Règles d'inférences.

### III.5.6. Choix de la méthode de défuzzification :

L'étape de la défuzzification est la dernière étape pour la conception d'un régulateur flou. Elle consiste à transformer une valeur floue (fonction d'appartenance résultante) en une valeur physique (déterministe), Dans notre travail, notre choix c'est porté sur la méthode la plus utilisée. Il s'agit de la défuzzification par centre de gravité à la fonction d'appartenance. Ce choix est particulièrement motive par le fait qu'elle est facile à implanter et ne demande pas beaucoup de calcul.

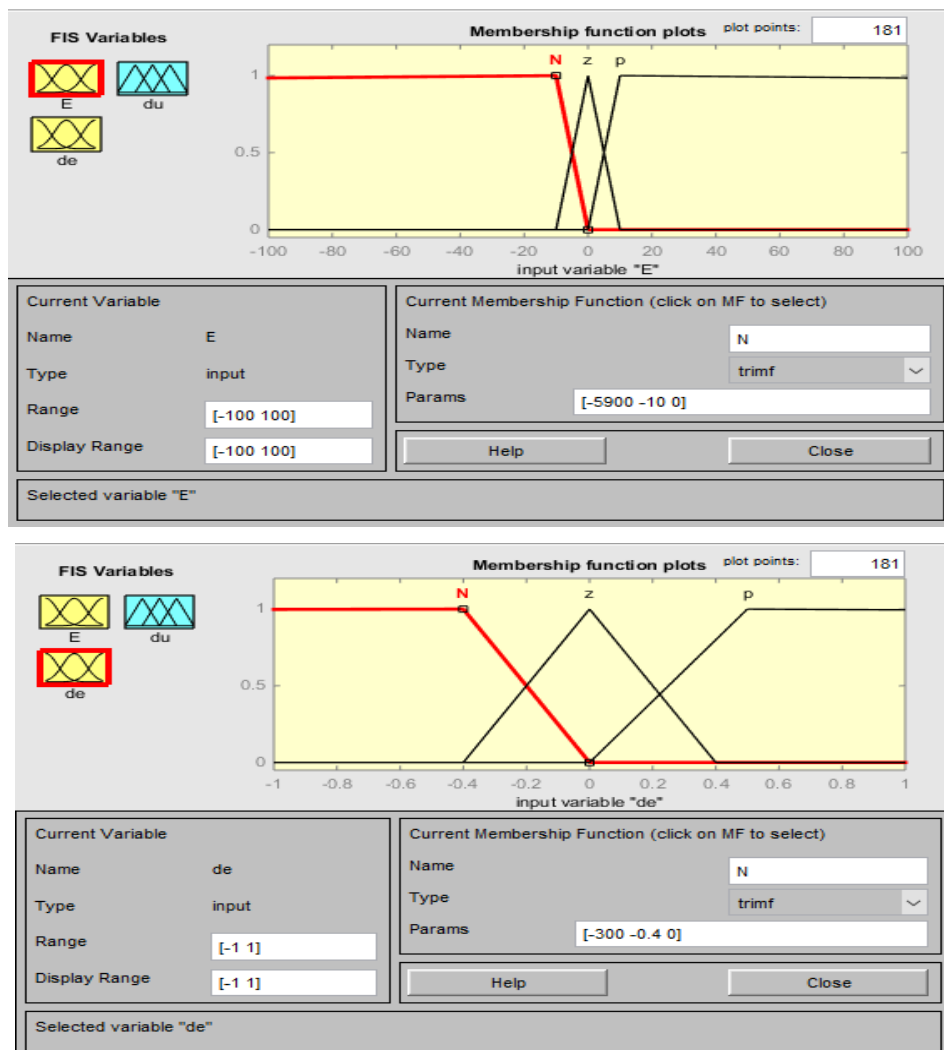


Fig. III.5. Fonctions d'appartenance utilisées dans la fuzzification.

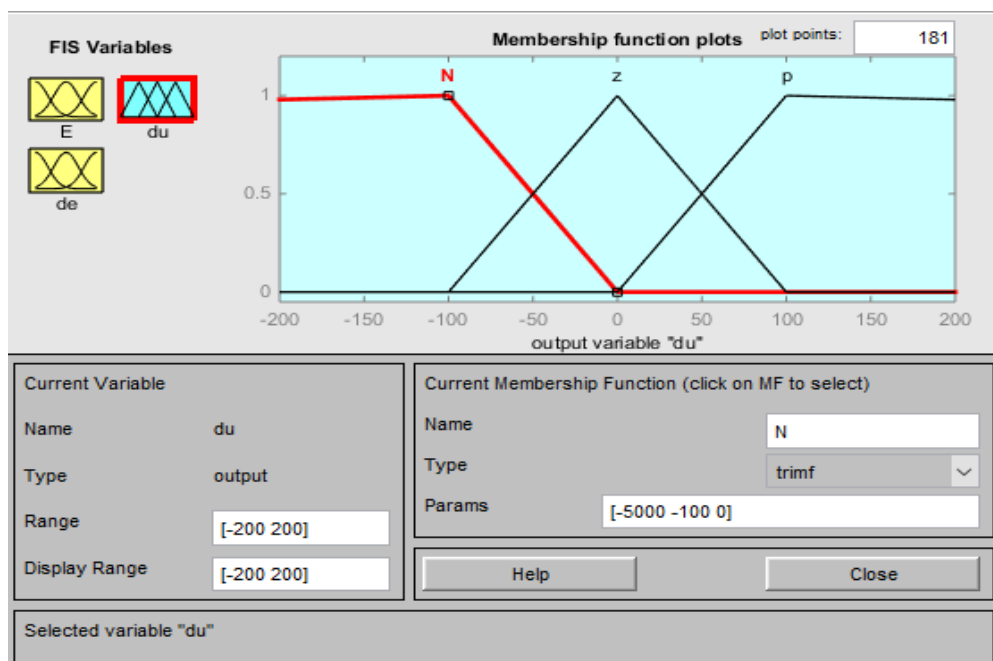


Fig. III.6. Fonctions d'appartenance utilisées dans la défuzzification.





# CHAPITRE IV

*Simulation, validation et interprétations des  
résultats*



La figure IV.1 illustre la partie attraction du véhicule électrique envisagé dans ce travail. Il est doté de plusieurs blocks insérés sous forme (Subsystem) définis comme suit :

- Block pour le moteur synchrone à aimant permanent
- Block de régulation
- Block de transformation de Park
- Block de l'onduleur

### IV.3. Résultats de simulations

Le but de cette simulation est de valider les contrôleurs utilisés pour la régulation de vitesse et le modèle adopté de la machine synchrone à aimant permanent, et analyser le comportement lorsque la machine est alimentée par un onduleur de tension commandé par modulation de la largeur d'impulsion (MLI).

#### IV.3.1. Résultats de simulation avec un régulateur PI

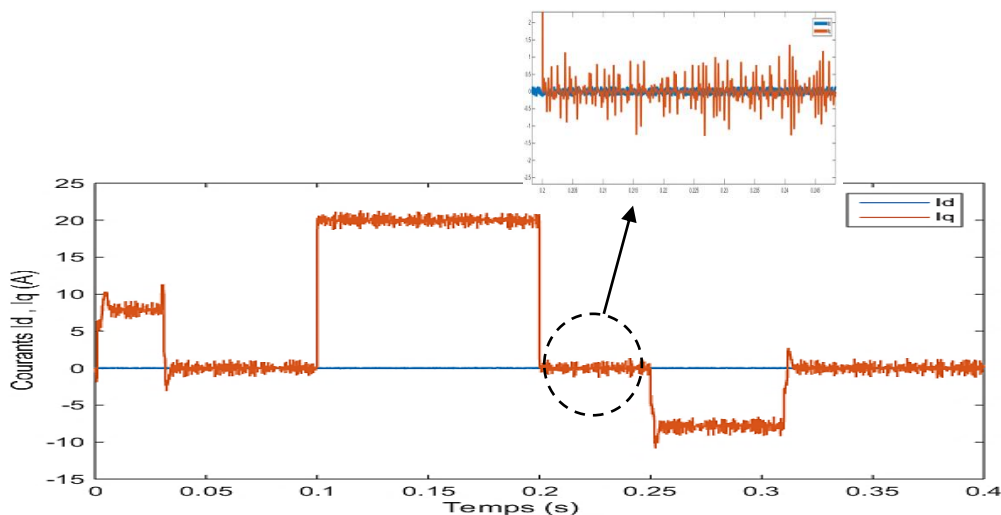


Fig. IV.2. Allure des courants  $I_d$ ,  $I_q$ .

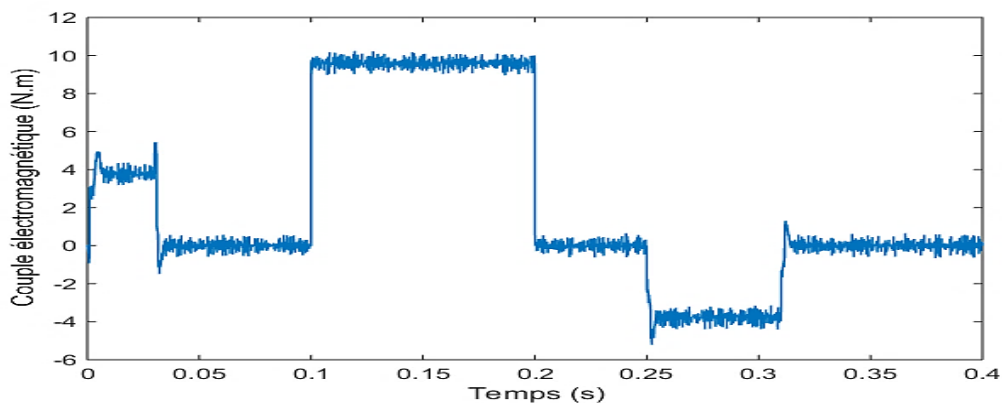


Fig. IV.3. Couple électromagnétique de la MSAP avec un régulateur PI

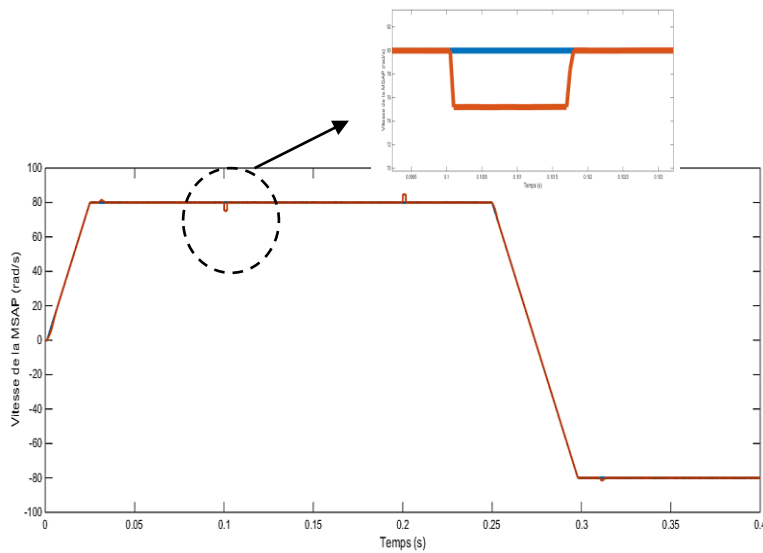


Fig. IV.4. Vitesse de rotation de la MSAP

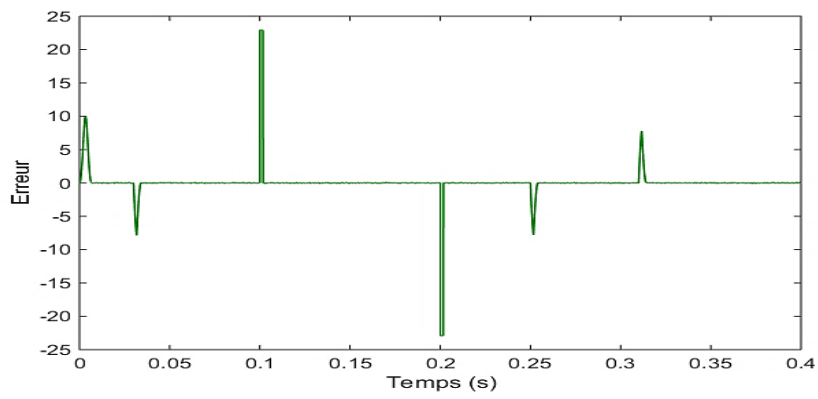


Fig. IV.5. Allure de l'erreur

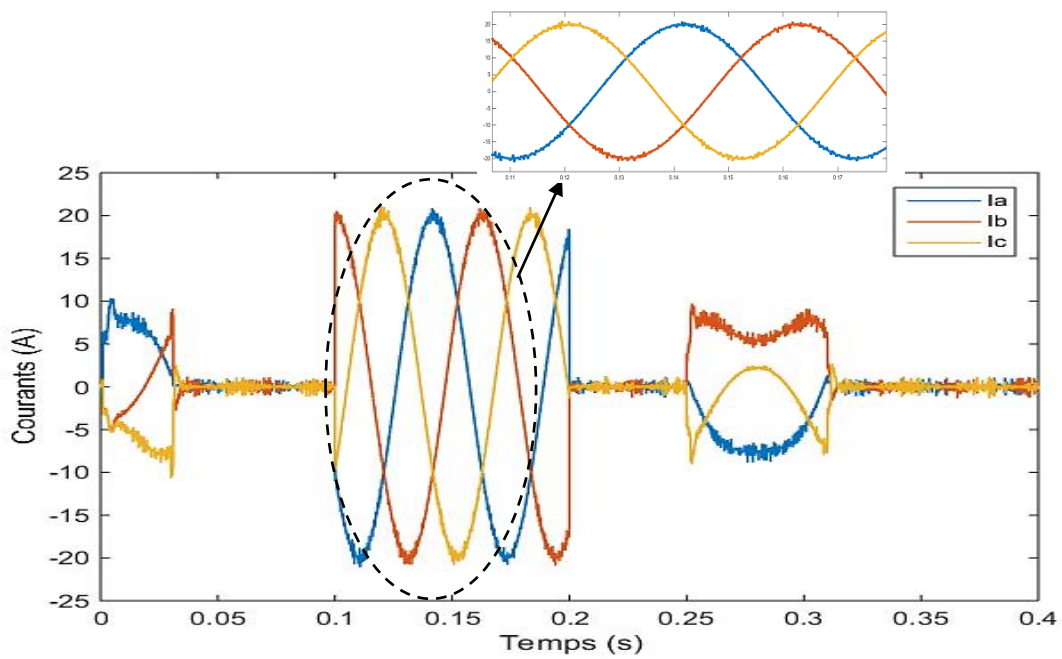
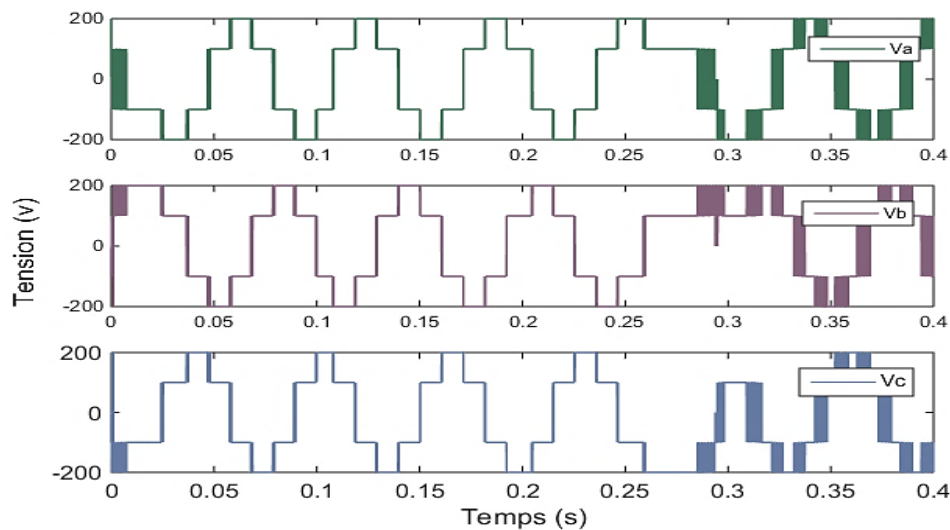


Fig. IV.6. Les courants statoriques  $I_{sabc}$



**Fig. IV.7.** Tensions  $U_{abc}$  à la sortie de l'onduleur

### IV.3. 2. Interprétation des résultats

Les figures des courants, du couple, de la vitesse  $\omega$  (rad/s) et de la tension à la sortie de l'onduleur sont présentées respectivement. On remarque que la vitesse se stabilise à sa valeur de référence après et le régime transitoire de démarrage en 0.025 seconde, et au démarrage de la machine absorbe un courant de 20A pour développer un couple capable de vaincre les couples résistants dont le couple dû à l'inertie qui est proportionnel à la variation de vitesse. Par contre dans le régime le courant diminue à 10 A en appliquant un couple résistant de 10 N/m (figures IV.2, IV.3, IV.4, IV.6 et IV.7).

Durant le fonctionnement de la machine à vide on remarque que :

- La vitesse du moteur suit parfaitement les consignes imposées.
- La composant  $I_d$  est maintenue à 0 par le régulateur de courant.
- La composant  $I_q$  présente un pic au démarrage (10 A) puis s'annule rapidement.
- Le couple électromagnétique présente un pic notable.

Et pendant l'application de la charge avec un couple de charge ( $C_r = 10$  N.m) à  $t = 0.10$ s jusqu'à  $t = 1.20$ s, on note que l'allure de la vitesse est obtenue avec un dépassement lors des changements brusque et que le régulateur PI rejette les perturbations d'une manière très lente.

- Dégradation des performances de poursuite de vitesse et des courants (présentant des pics importants) au moment de l'introduction du couple de charge.
- Le courant  $I_d$  est maintenu à zéro quel que soit la variation de la charge et la variation de la vitesse ce qui prouve le principe de la commande vectorielle.
- Le courant  $I_q$  contrôle le couple est reste dans les limites de fonctionnement de la machine.

- Le couple électromagnétique a la même allure que le courant  $I_q$ . En dehors du couple de démarrage et celui de l'inversion, il développe un couple moteur pour entraîner la charge.
- Augmentation de l'effort de commande (tension de commande).

Lors de l'application de la charge, des perturbations importantes apparaissent sur la vitesse, néanmoins elle se rétablit progressivement au rythme de l'inertie du système et le temps de rétablissement de la vitesse est proportionnel à l'importance de la perturbation. Les oscillations du courant  $I_d$  demeurent stables autour de la référence zéro.

On a distingué que les régulateurs classiques (PI) donne toujours des meilleurs résultats pour un réglage de vitesse mais l'inconvénient majeur de ses régulateurs reste sensible toujours aux changements des paramètres ou aux variations paramétriques.

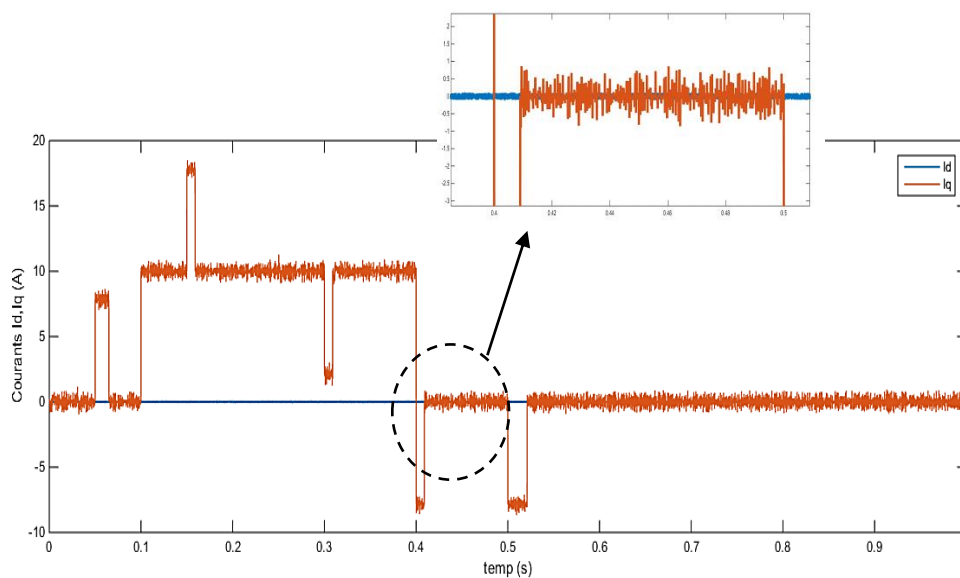


Fig. IV.9. Allure des courants  $I_d$ ,  $I_q$ .

### IV.3.3. Simulation avec un régulateur logique Flou

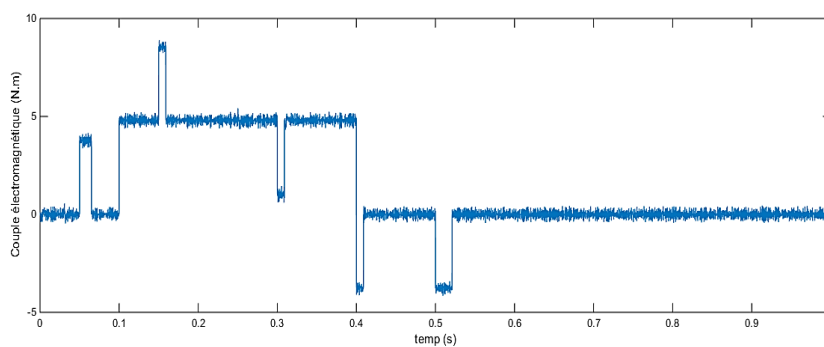


Fig. IV.10. Couple électromagnétique de la MSAP avec un régulateur flou

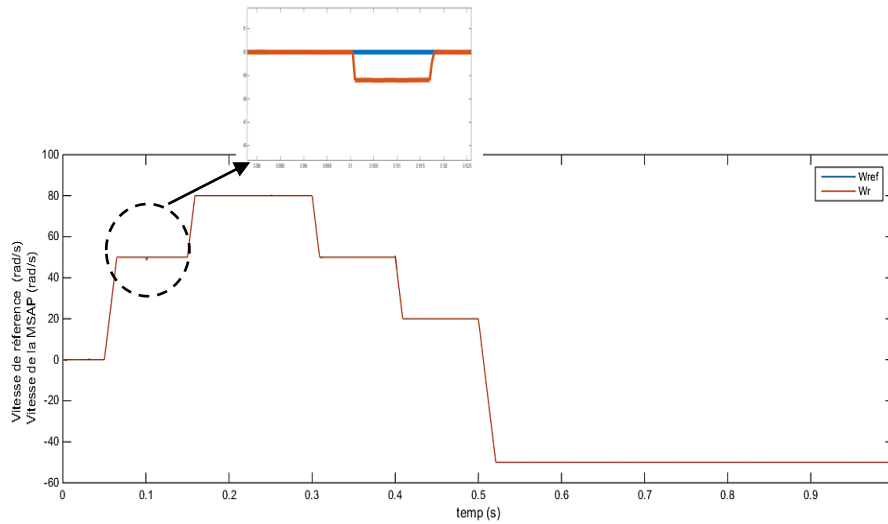


Fig. IV.11. Vitesse de référence et de rotation de la MSAP

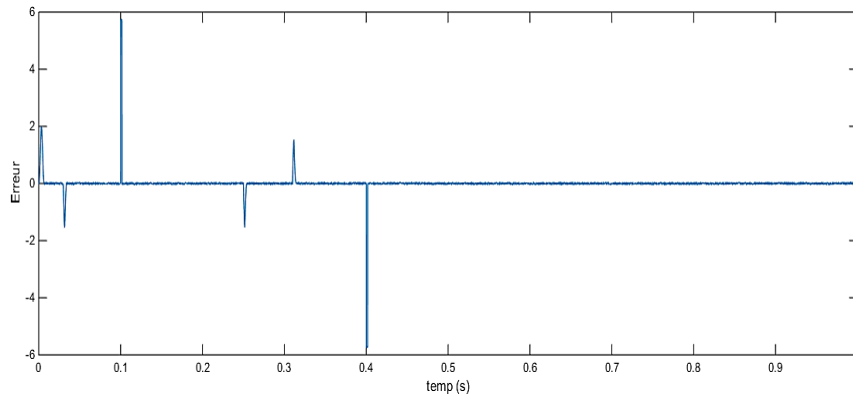


Fig. IV.12. Allure de l'erreur

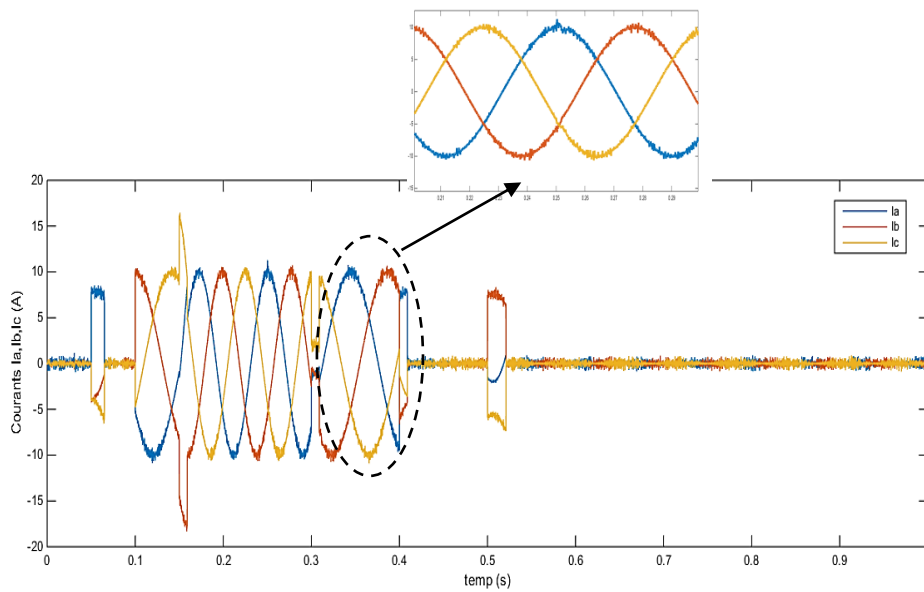
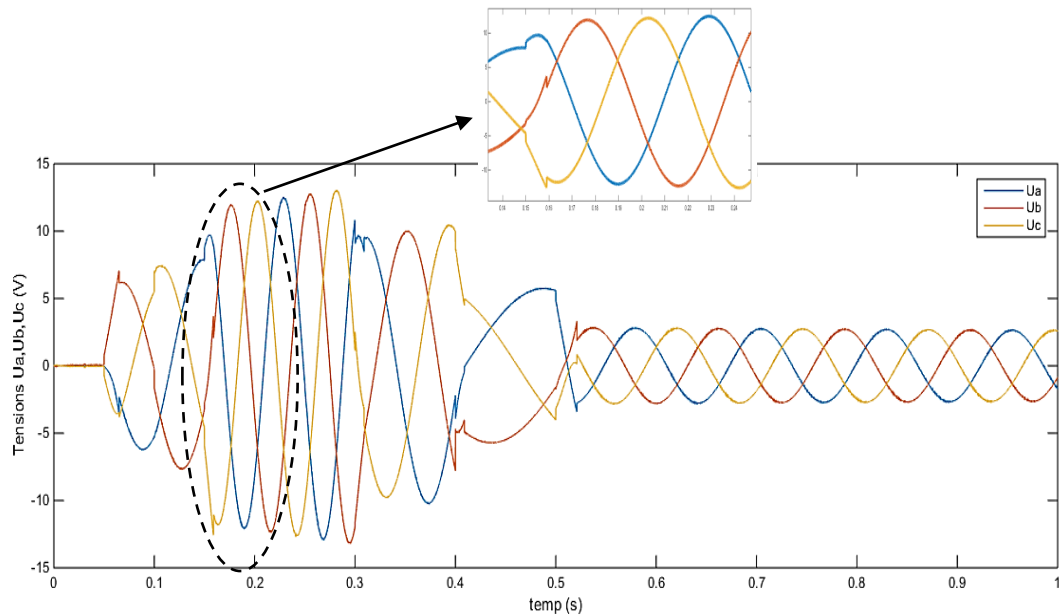


Fig. IV.13. Les courants statoriques  $I_{sabc}$





**Fig. IV.14.** Allure des tensions  $U_{abc}$

#### IV.3.4. Interprétation des résultats :

A partir des résultats de simulation obtenus on déduit que :

- La vitesse de rotation de la MSAP suit bien sa référence,
- Le couple se stabilise directement après la phase de démarrage,
- Le couple électromagnétique est alors proportionnel au courant  $I_q$ .

En appliquant sur le moteur avec une charge « 5Nm » entre [0.1 et 0.4] s. Les performances du réglage sont très satisfaisantes. La dynamique de poursuite est légèrement affectée lors de la variation du couple de charge. Le rejet de perturbation est très rapide. Nous remarquons que :

- La vitesse de rotation suit sa référence malgré les perturbations où on constate une compensation rapide de l'effet des perturbations (couple de charge et variation paramétrique),
- Le couple électromagnétique répond instantanément à la perturbation, et de même pour le courant  $I_q$  par contre le courant  $I_d$  reste constant. Les fluctuations enregistrées sur les courants sont dû à la commande de l'onduleur.
- Les réponses du courant statorique montrent le découplage créé par la commande vectorielle de la machine ( $I_d=0$ ) donc le couple électromagnétique dépend seulement de la composante  $I_q$ .

#### IV.4. Étude comparative des deux méthodes

En observant les résultats précédents, on remarque que le comportement des deux régulateurs est identique durant les régimes permanents, mais le régulateur Flou présente les avantages suivants :

- Moins d'oscillations au démarrage et lors des changements de consigne,
- Les pics des perturbations sont beaucoup moins importants avec le RLF,
- La régulation par logique floue donne de bonnes performances pour ce qui est de la qualité des réponses dynamiques du système. C'est l'une des principales propriétés de la logique floue qui permet de définir et d'atteindre avec facilité un équilibre optimal.

#### IV.5. Conclusion

Dans le présent chapitre, une série de simulation a été effectuée pour tester les performances d'un véhicule électrique via les lois de contrôle proposées. Ces lois de contrôle ont été conçues pour améliorer le système de la propulsion électrique.

Nous remarquons le système de propulsion électrique souffre toujours de plusieurs problèmes, tels que le broutement, la vitesse de réponse, les erreurs de suivi, les mauvaises performances en régime permanent, et ces problèmes vont affecter la performance globale du véhicule électrique. Pour résoudre ces problèmes, nous avons appliquée deux types de régulateurs.

- Technique de régulations par régulateur (Proportionnel Intégral).
- Technique de régulations par régulateur Floue (RLF).

Les résultats de simulation précédents dégagent quelques conclusions pertinentes :

- L'utilisation du contrôleur Flou a donné une amélioration des performances dynamiques comparées au correcteur PI ;
- Un RLF est plus robuste qu'un régulateur classique de type PI face aux variations des conditions de fonctionnement ;
- La technique du réglage par logique floue permet à la commande d'être insensible à de telles variations, la vitesse est peu affectée par les perturbations et suit sa consigne.

On peut conclure que la commande par logique floue associée à la commande vectorielle se prête bien pour le réglage de la vitesse et de la machine synchrone à aimants permanents.

*CONCLUSION*

*CONCLUSION*

*GENERALE*

*GENERALE*

## **Conclusion Générale**

Le véhicule électrique (VE) est un système complexe constitué de composants très variés de natures différentes (mécanique, électrique, électrochimique,) en interaction. Son comportement est donc sensible à toute variation des caractéristiques de l'un de ses composants à travers ces interactions. L'analyse du véhicule électrique en tant que système nécessite alors la modélisation des différents composants intervenant dans sa chaîne de traction. Le choix et l'agencement de ces composants, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche.

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inertie ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes.

Actuellement le contrôle de vitesse des machines synchrones et asynchrones s'effectue par des commandes scalaires ou vectorielles. Dans ces approches, les algorithmes de commande reposent sur une modélisation de la machine à piloter en considérant l'onduleur comme un actuateur de tension.

La simulation est devenue un passage obligatoire pour concevoir, caractériser, contrôler ou surveiller un processus quelconque. C'est dans ce contexte que nous contribuons à la commande et la modélisation d'un véhicule électrique sous l'environnement MATLAB /Simulink. Cet outil de simulation nous a permis d'une part d'étudier le comportement dynamique et électrique du véhicule et de proposer un meilleur contrôle du véhicule.

Une présentation générale sur les systèmes à propulsion électrique en présentant des différentes architectures de la chaîne de traction du véhicule électrique est donnée. La chaîne est basée sur l'utilisation d'un moteur synchrone à aimants permanents alimenté par un onduleur de tension tout en présentant leurs modèles mathématiques. L'ensemble de ces deux modèles a constitué le modèle global du véhicule.

Pour appliquer les lois de commande proposées, nous avons divisé le véhicule électrique en deux parties (source d'énergie, moteur propulseur). Pour la partie source, la batterie est connectée à l'onduleur de tension à MLI qui assure l'alimentation du MSAP, et pour la commande du moteur propulseur, notre choix a été fixé sur la commande vectorielle qui permet le découplage du système de la machine.

Pour la commande de la vitesse du véhicule, nous avons appliqué la commande vectorielle associée à un régulateur classique PI en première phase. Ce type de régulateur a donné de bonnes performances en termes de stabilité, rapidité et précision. Mais suite aux tests de robustesse, il apparaît que ce réglage classique PI est sensible aux variations paramétriques du système tel que la variation de l'inertie. Ceci est dû essentiellement au calcul du régulateurs PI basé sur le modèle linéaire.

Afin de remédier à ce problème, les contrôleurs non linéaires robustes, participent d'une manière considérable à l'élimination des oscillations et des fluctuations sur les différentes caractéristiques de vitesses, de couple et de courant. Le chapitre trois a fait l'objet de cette étude. Le régulateur linéaire de type PI est remplacé par des régulateur à logique flou. Cette technique de commande donne une très bonne performance au niveau des ondulations du flux et du couple avec un temps de réponse court par rapport au PI conventionnel.

## Perspectives

- L'implémentation de l'algorithme de commande développé sur un banc d'essai expérimental.
- Validation expérimentale du système (Onduleur- MSAP) étudié et son application au véhicule électrique hybride dans des parcours réels avec toutes les conditions de fonctionnement que peut rencontrer le véhicule dans la nature quotidiennement ;
- Enrichir le travail effectué par l'étude de l'influence du taux d'hybridation des plusieurs sources (Batterie et Super capacités) sur la technique de gestion.
- Nous espérons pouvoir faire la conception d'un prototype de véhicule électrique.

# *BIBLIOGRAPHIQUE*

BIBLIOGRAPHIQUE

## Bibliographie

- [1] ARARIA Rabah ;''Contribution à la Modélisation et la Commande d'un Véhicule Electrique Hybride à Architecture Série/Parallèle (Étude Théorique et Expérimentale)'' ; Thèse de doctorat ; Université Ibn-Khaldoun De Tiaret ; 25/10/2020
- [2] MARIF Ismail et ABDAT Hichem ;''La commande en vitesse d'un véhicule Electrique'' ; Mémoire MASTER ; Université de Tlemcen ; 03/07/2019
- [3] BOUGUENNA Ibrahim Farouk ;''Commande Robuste d'une Chaîne de Traction d'un Véhicule Electrique Multi sources'' ; Thèse Doctorat en Sciences ; UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES ; 13/02/ 2020.
- [6] BOUGHANEM SAMIR et CHAOUCHI RABAH ;''Commande en vitesse d'un véhicule électrique '' ; Mémoire de Fin d'Etude De MASTER ACADEMIQUE ; Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou ; 18 /09/2018.
- [7] GUENIDI Sif Eddine ;''Modélisation, commande et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique hybride'' ; Mémoire de magister ; ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE ; 19 /06 / 2011.
- [8] GHARBI HENNI ;''Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride'' ; Thème ; Université Hassiba Ben Bouali Chlef ; 2014/2015.
- [15] Xavier Rain est professeur agrégé de génie électrique à l'IUT de Cachan ; issue d'une publication de La Revue 3EI, "Les solutions actuelles de motorisations pour véhicules électriques" Université de Paris-Saclay. numéro 99 de janvier 2020.
- [16] Christelle Saber et Najib Rouhana sont Docteurs ingénieurs en électronique de puissance; issue d'une publication de La Revue 3EI ;"Chargeurs de batteries de véhicule électrique"; numéro 99 de janvier 2020.
- [24] ''Chapitre 2 : Modélisation des éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.''
- [25] ABDELLAOUI Hassina, 'Amélioration des performances des convertisseurs électromécanique basés sur la machine synchrone à aimants permanents ', Thèse de doctorat, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU ,29/06/2020.
- [26] NABTI Khalil, 'Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone'', Thèse de doctorat, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 14 / 12 / 2010.
- [27] BECHEUR Ahmed et DJOUDER Mohamed, 'Modélisation et commande d'un véhicule électrique a base d'une machine synchrone à aimant permanents '' ,Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE,UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU ,30 Septembre 2015
- [28] SENHADJI Nawel et CHALABI Ammaria, 'Commande du moteur synchrone à aimants permanents par backstepping ', Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen ,14/06/2015
- [29] AMEUR AISSA, ''Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants '' , Thème Magister, Université de Batna, 25.10.2005
- [32] ''Chapitre III : Commande vectorielle de la GADA' ', Université de Saida.

- 
- [33] Mr. SERHOUD Hicham, 'Commande des machines électriques', Cours, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued.
- [34] BENARIBA Hassan, 'Contribution à la commande d'un véhicule électrique', Thèse, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 06/ 12 / 2018,
- [35] FERROUDJ ABDELMALEK, 'Commande Non-Linéaire de la MSAP Sans Capteur de Vitesse. Apport des Méthodes de L'intelligence Artificielle', Thème, Université de Batna, 2011
- [36] BERRABAH Ahmed Bahaeddine et HAMZA Oussama, 'Commande par logique floue d'une machine synchrone à aimant permanent', Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF - M'sila, 2018/2017
- [38] Docteur (Ph.D.), 'Commande numérique de machines asynchrones par logique floue' 'thèse, Université LAVAL - Québec, décembre 1997
- [39] Talbi Nesrine, 'Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Non linéaires', Université de Constantine 1, 2014 / 02/ 25
- [40] Chabani Laid et Guedda Ali et Messaoudi imad Eddine, 'Commande par la logique floue de la machine synchrone à aimants permanents', Thème, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020-2021
- [41] TOUAL Belkacem, 'Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable', Thème, Université de Batna, 17/10/2010

## Sites internet :

- [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire\\_du\\_v%C3%A9hicule\\_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_du_v%C3%A9hicule_%C3%A9lectrique)
- [5] <https://www.renault.fr/vehicule-hybride.html>
- [9] <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/comment-fonctionne-un-vehicule-a-hydrogene/>
- [10] <https://www.caroom.fr/guide/voiture-propre/electrique/recharge/eco-conduite/prolongateur-autonomie>
- [11] <https://www.avatacar.com/blog/mecanique-auto/fonctionnement-moteurs-electriques-hybrides/>
- [12] <https://www.expert-ve.fr/moteur-onduleur-ve.html>
- [13] <https://www.lesnumeriques.com/voiture/qu-faut-savoir-sur-moteur-voitures-electriques-a3681.html>
-



- [14] <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/electrique/s-2263-fonctionnement-du-moteur-a-reluctance-variable.php>
  - [17] <https://izi-by-edf.fr/blog/recharge-chargeur-embarque-differents-types/>
  - [18] <https://www.automobile-propre.com/dossiers/recharge-voitures-electriques/>
  - [19] <https://beev.co/voitures-electriques/recharger-son-vehicule-electrique/?cn-reloaded=1>
  - [20] <https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/511041/batterie-de-voiture-electrique>
  - [21] <http://www.lerepairedesmotards.com/actualites/2021/supercondensateur-energie-alimentation-batterie-electrique.php>
  - [22] [https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule\\_%C3%A0\\_pile\\_%C3%A0\\_combustible](https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_%C3%A0_pile_%C3%A0_combustible)
  - [23] <https://achat-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/749599/fonctionnement-de-la-voiture-electrique>
  - [30] [https://ecomobile.gouv.qc.ca/fr/fondements/forces\\_physiques.php](https://ecomobile.gouv.qc.ca/fr/fondements/forces_physiques.php)
  - [31] <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/voiture-electrique-freinage-regeneratif-7533/>
  - [37] <https://www.researchgate.net/publication/326626051>
  - [42] <http://www.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/la-logique-floue-interets-et-limites/>
  - [43] <http://thesis.univ-biskra.dz/1151/5/3emechapitre.pdf>
-

## ملخص

يعتبر استخدام السيارة الكهربائية أحد الحلول الجدية الموصى بها من قبل كبريات الشركات العالمية المصنعة كما أظهرت العديد من الأبحاث أن السيارات الكهربائية أكثر كفاءة وصديقة للبيئة من السيارات العادية وعدم وجود انبعاثات للغازات الضارة بالبيئة والصحة. أما من منظور الكفاءة الاقتصادية فإن استعمال السيارة الكهربائية يساعد على توفير المزيد من تكاليف الوقود وأن مستقبلها في السنوات القادمة يعد من المواضيع البحثية الموضوعية والمهمة من أجل الاستفادة من مزاياها الإيجابية من الناحية البيئية والاقتصادية.

يندرج هذا العمل في إطار دراسة وتحسين أداء نظام الدفع الكهربائي المتغير السرعة لمركبة كهربائية استنادًا إلى استخدام MSAP المدعوم بعكس جهد ثلاثي الأطوار والدراسة بمحاكاة سلوكها من حيث القيادة والتحكم عند المتغير السرعة من خلال إدخال منظمات PI التقليدية والنوع الضبابي لتعديل السرعة  
الكلمات المفتاحية: مركبة كهربائية ، MSAP ، منظم PI ، منظم ضبابي ، تحكم في القوة الموجهة.

## Résumé

L'utilisation du véhicule électrique est considérée comme l'une des solutions préconisées par les constructeurs ou son devenir dans les prochaines années est un sujet de recherche d'actualité toute en cherchant toujours, une meilleure qualité de vie, un environnement propre, une économie de l'énergie et en atténuant le réchauffement climatique de la planète qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances d'un système d'entraînement électrique à vitesse variable d'un véhicule électrique basé sur l'utilisation de la MSAP alimentée par un onduleur de tension triphasé et l'étude par simulation de son comportement en terme de commande et contrôle à vitesse variable en introduisant des régulateurs de types classique PI et flou pour le réglage de la vitesse.

**Mots-clés :** Véhicule électrique, MSAP, régulateur PI, régulateur flou, commande vectorielle.

## Abstract

The use of the electrical vehicle is one of the serious solutions recommended by major international manufacturers, and many researches have shown that electric cars are more efficient and environmentally friendly than regular cars, with no emissions of gases harmful to the environment and health. From the perspective of economic efficiency, the use of the electric car helps to save more fuel costs, and that its future in the coming years is one of the topical and important research topics in order to benefit from its positive advantages in terms of environmental and economic terms.

This work deals with the performances improvement of a variable speed electric drive system of an electric vehicle based on the use of the MSAP fed a three-phase voltage inverter and the study by simulation of its behavior in terms of command and control at variable speed by introducing conventional PI and fuzzy type regulators for speed adjustment.