

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département : Génie Electrique

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**LOUCIF Abdelaziz**  
**CHEKHMAM Djedjiga**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière :ELECTROMECHANIQUE  
Option : ELECTROMECHANIQUE

**Thème :**

Etude et simulation d'un véhicule électrique à base d'un MAS à cage  
d'écureuil soumis à un parcoure variable

Devant le jury composé de :

M. BENZIANE     MAA  
A. BOUHEDDA    MAA  
H.A. BENGHENIA   MAA

UAMOB  
UAMOB  
UAMOB

Président  
Encadreur  
Examineur

Année Universitaire 2020/2021

# REMERCIEMENT

*Ce présent travail a été réalisé au sein du Département de Génie Electrique  
de l'université d'Akli Mohand Oulhadj.*

*Avant tous, nous remercions le Dieu, notre créateur de nous avoirs donné la force,  
la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Mr. Ali BOUHEDDA qui a  
proposé le thème de ce mémoire, pour ses conseils du début à la fin de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur  
qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*On tient également à exprimer toute nos reconnaissances à notre ami et notre  
collègue Faci Younes. Ingénieur en électromécanique, pour ses nombreux conseils  
et son temps qu'il a consacré pour nous aider.*

*Nous souhaitons également exprimer nos sincères remerciements à notre  
camarade Loqmane Hassane qui nous a fourni des conseils utiles.*

*Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui  
nous ont toujours soutenus et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la  
réalisation de ce mémoire.*

# *Dédicaces*

*Je dédies ce modeste travail*

*A ma mère qui m'a aidés dans toutes ma vie, Debbab khadra*

*A ma sœur aînée Samira et à son mari Khalifa qui m'ont beaucoup aidé  
dans ma carrière*

*Et à leurs familles Kaddour, Ayman et Othman, Louiza et leur fils  
Abdelrahmane*

*A mon cher ami qui a toujours été à mes côtés Faci Younes  
A mes adorables sœur Khayra et Huda et leurs maris Djamal, Mahfoud et  
Leurs familles*

*A mes frères Ahmed, Mohamed, Tayab, Mustapha, Ismail, Youcef  
Et toutes leurs familles*

*A tous mes amis surtout, Mustapha, Majid, Amin,  
Yabadas, Abdelhafid et Loqmane  
Et à tous mes collègues*

***Loucif Abdelaziz***

## *Dédicace*

*Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui ont su me comprendre et qui m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents.*

*A mes frères et sœurs et toute la famille « Chekhmam et Badis » sans exception.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours soutenu, et tous mes amis de la Promotion Génie électrique 2021. Sans omettre mon binôme Abdelaziz loucif avec qui j'ai élaboré ce Projet de fin d'étude.*

*En fin à tous ceux qui m'apprécient à ma juste valeur.*

***Chekhmam Djedjiga***

## **Résumé**

Ce projet de fin d'études porte sur l'étude et simulation d'un véhicule électrique (VE) à base d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Il présente principalement la simulation avec la commande vectorielle.

Le travail présenté fait l'objectif de deux grands axes : La première partie se focalise sur la modélisation et la simulation des composants de la chaîne de traction de VE que ce soit la MAS, l'onduleur MLI, ou encore la dynamique de VE avec ses différentes contraintes.

Le deuxième axe concerne la simulation de VE avec la technique de la commande vectorielle commande vectorielle (CV) afin d'avoir la performance de stabilité dans les différentes contraintes de la route.

**Mots-clés:** Véhicule électrique (VE), Machine asynchrone(MAS), Commande vectorielle (CV).

## **Abstract :**

This graduation project focuses on the study and simulation of an electric vehicle (EV) based on an asynchronous squirrel cage machine. It mainly presents simulation with vector control.

The work presented has two main axes: The first part focuses on the modeling and simulation of the components of the EV traction chain, whether it is the MAS, the PWM inverter, or even the dynamics of EV with its various constraints.

The second axis concerns the simulation of EV with the technique of vector control vector control (CV) in order to have the performance of stability in the various constraints of the road.

**Keywords:** Electric vehicle (EV), Asynchronous machine (MAS), Vector control (CV).

## ملخص

يركز مشروع التخرج هذا على دراسة ومحاكاة مركبة كهربائية بناءً على محرك قفص السنجاب غير

المتزامن. يقدم بشكل أساسي المحاكاة مع التحكم في النواقل.

يهدف العمل المقدم إلى محورين رئيسيين: الجزء الأول يركز على النمذجة والمحاكاة لمكونات سلسلة الجر،

سواء كان المحرك غير متزامن، العاكس، او حتى ديناميكيات السيارة الكهربائية مع قيودها المختلفة.

يتعلق المحور الثاني بمحاكات السيارة الكهربائية باستخدام تقنية التحكم في النواقل من اجل الحصول على اداء

الاستقرار في مختلف قيود الطريق.

الكلمات المفتاحية:

سيارة كهربائية, المحرك الغير متزامن, تقنية التحكم في النواقل

# Sommaire

---

## CHAPITRE I : Généralités sur le véhicule électrique.

I	Introduction général .....	1
I.1	Introduction.....	2
I.2	Définition.....	2
I.2.1	Le Bloc Moteur Electrique.....	3
I.2.2	Le Bloc de Commande et de Contrôle .....	3
I.2.3	Le Bloc de Puissance.....	3
I.3	Technologies émergentes.....	3
I.3.1	Véhicules Electriques à Batterie.....	3
I.3.2	Véhicules hybrides .....	4
I.3.2.a	Véhicule hybride série.....	4
I.3.2.b	Véhicule hybride parallèle.....	5
I.3.2.c	Véhicule hybride combiné.....	6
I.4	Solution de transmission mécanique dans une chaine de traction tout électrique.....	7
I.4.1	Solution avec boîte de vitesse mécanique.....	7
I.4.2	Solution avec réducteur mécanique à rapport fixe.....	8
I.4.3	Solutions multi-moteurs.....	8
I.5	La chaine de traction électrique.....	11
I.5.1	Le moteur électrique d'entraînement .....	11
I.5.2	La source d'énergie .....	13
I.5.2.1	Les différentes technologies de batteries envisageables .....	14
I.5.2.2	Pile á combustible.....	16
I.5.3	le super condensateur.....	17
I.5.4	Les convertisseurs statiques.....	17
I.5.4.1	Les redresseurs (AC-DC) .....	17
I.5.4.2	Les hacheurs (DC-DC) .....	18
I.5.4.3	Les onduleurs (DC-AC).....	18
I.6	La puissance nécessaire pour tracter le véhicule .....	19
I.7	Avantages et inconvénient des véhicules électriques .....	22
I.7.1	Avantages.....	22
I.7.2	Inconvénients.....	22
I.8	Conclusion.....	23

## CHAPITRE II Modélisation des différentes parties de la chaîne d'entraînement du véhicule électrique

II.1	Introduction.....	25
II.2	Description de la chaîne de traction.....	25
II.2.1	Le moteur électrique d'entraînement.....	26
II.2.1.1	Les différents moteurs d'entraînement.....	26
II.2.1.2	Le moteur à courant continu(MCC) .....	26
II.2.1.3	Moteur à courant alternatif.....	27
II.3	modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	28
II.3.1	Hypothèses simplificatrices.....	29
II.3.2	Equations de la machine asynchrone triphasée.....	29
II.3.2.1	Equations électriques.....	29
II.3.2.2	Equation des flux.....	30
II.3.2.3	Equation mécanique.....	31
II.3.3	Transformation de Park.....	31
II.3.4	Application de la transformation de Park au modèle de la MAS.....	33
II.3.5	Equations d'état de la MAS .....	34
II.4	Modélisation dynamique du véhicule.....	35
II.4.1	Contraintes dynamiques sur le véhicule.....	36
II.4.2	Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale.....	37
II.4.3	Couples résistant au déplacement.....	39
II-4-4	Roulement uniforme sur sol plat.....	39
II-4-5	Franchissement de pente.....	41
II.4.6	Franchissement d'obstacles.....	42
II.4.7	Accélération.....	42
II.4.8	Résistance au glissement (adhérence).....	43
II.5	Transmission et réducteur mécanique.....	43
II.6	Conclusion.....	44

## CHAPITRE III simulation du véhicule électrique

III.1	Introduction.....	47
III.2	Simulation de la machine asynchrone.....	47
III.2.1	Le schéma bloc de la machine asynchrone.....	48
III.2.2	Les résultats de simulation.....	48
III.2.3	Interprétation des résultants.....	49
III.3	Commandes de la machine à induction.....	50
III.3.1	Commande scalaire .....	50
III.3.2	Commande vectorielle.....	50
III.3.3	Commande directe du couple (DTC) .....	51
III.3.4	Commande par mode glissant.....	51
III.4	Principe de la commande vectorielle à flux orienté.....	52
III.5	Types de la commande vectorielle.....	53
III.5.1	Commande vectorielle directe.....	53
III.5.2	Commande Vectorielle Indirect.....	54
III.6	Choix du référentiel .....	54
III.7	Principe de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique....	54
III.8	Découplage.....	56
III.8.1	Découplage entré-sortie.....	57
III.8.2	Découplage par compensation.....	57
III.9	Bloc de défluxage.....	59
III.10	Régulation.....	59
III.10.1	Conception des régulateurs.....	60
III.10.1.1	Action proportionnelle.....	60
III.10.1.2	Action intégrale.....	60
III.10.2	Calcul des régulateurs .....	61
III.10.2.1	Régulation de courant.....	61
III.10.2.2	Calcule le régulateur de vitesse.....	62
III.11	Modélisation du L'onduleur MLI.....	64
III.12	Simulation de la commande vectorielle de la MAS.....	64
III.12.1	Résulta de simulation.....	65
III.12.2	Interprétation des graphes.....	66
III.13	Application du cycle de conduite au VE avec la technique de la commande vectorielle .....	67
III.13.1	Le Schéma bloc.....	67
III.13.2	Résultats de simulation.....	67
III.13.3	Interprétation des résultats de simulations.....	70
III.14	Conclusion.....	70

**Conclusion générale.....71**

# Liste des tableaux

---

<b>Tab1.1</b> : Différents Modèles des Véhicules Electriques.....	<b>11</b>
<b>Tab 1.2</b> : Technologies des batteries.....	<b>16</b>
<b>Tab 1.3</b> : Puissance maximale nécessaire pour divers véhicules.....	<b>21</b>
<b>Tab 2.1</b> : Quelques valeurs de coefficient de friction $\mu$ .....	<b>44</b>

## Notations symboliques et abréviations

---

VE : Un véhicule électrique

BV : la boîte de vitesses

MCC : Le moteur à courant continu

MAS : Le moteur à induction

MSAP : Le moteur synchrone à aimant permanent

DTC : Commande directe du couple

MLI Modulation de largeur d'impulsion

DFOC Direct Field Oriented Control

PI : Correcteur Proportionnelle Intégrateur

MRV : Le moteur à reluctance variable

NEDC New Europeen Driving Cycle

$J$  : inertie de toutes les masses tournantes ramenées au rotor de la machine

$C_{em}$  : couple électromagnétique

$\Omega$  : vitesse angulaire mécanique du rotor

$C_f$  : couple dû aux frottements du système d'entraînement

$C_r$  : couple mécanique de la charge

D : directe

Q :quadratique

P(t) : la puissance instantanée

X : vecteur d'état.

U : vecteur de commande.

A : matrice fondamentale qui caractérise le système.

B : matrice d'application de la commande

M : Masse du véhicule

$\gamma$  : Accélération tangentielle du véhicule

$g$ : Accélération de pesanteur

$\rho$  : Rayon du virage.

$V$  : Vitesse du véhicule.

$\mu$  : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route

$C_r$  roue : Le couple résistant à la roue

$F_{rt}$  : l'effort résistant total

$R_r$ : Résistance au roulement.

$R_a$  : Résistance aérodynamique.

$R_p$ : Résistance due à la pente.

$r$  : rayon d'une roue.

$\rho_a$ : désigne la masse volumique de l'air

$S$  : est la surface frontale du véhicule

$C_x$  : est le coefficient de pénétration dans l'air

$V$  : est la vitesse du véhicule

$f$  Coefficient de frottement [  $N.m. / rad$  ].

$R_S$  Résistance statorique [ohm].

$C_e$  : Couple électromécanique [Nm].

$C_r$  : Couple résistant [Nm].

$P$  : Nombre de pair de pôle.

$T_s$  : Constante de temps statorique[s].

## Liste des figures

---

<b>Figure 1.1:</b> Synoptique d'un Système de Propulsion.....	2
<b>Figure 1.2 :</b> Véhicule électrique à batterie.....	4
<b>Figure 1.3 :</b> Véhicule hybride Série.....	5
<b>Figure 1.4 :</b> Véhicule hybride Parallèle.....	6
<b>Figure 1.5 :</b> Véhicule hybride combiné.....	6
<b>Figure 1.6 :</b> Solution monomoteur avec boîte de vitesse.....	7
<b>Figure 1.7 :</b> Solution monomoteur avec réducteur fixe.....	8
<b>Figure 1.8 :</b> Motorisation Multi-moteurs.....	9
<b>Figure 1.9 :</b> Moteur Roue.....	10
<b>Figure 1.10 :</b> Renault Kangoo Electri'Cité et Elect'Road.....	10
<b>Figure 1.11 :</b> véhicule électriques avec moteur asynchrone.....	13
<b>Figure 1.12 :</b> Production de l'électricité dans une pile à combustible.....	16
<b>Figure 1.13:</b> schema simplifié d'un super condensateur et principe de stockage de charge.....	17
<b>Figure 1.14 :</b> forces élémentaires agissant sur un véhicule.....	20
<b>Figure 1.15 :</b> Puissance requise aux roues pour une voiture urbaine à vitesse stabilisée.....	21
<b>Figure 2.1 :</b> Chaîne de traction d'un véhicule électrique.....	25
<b>Figure 2.2 :</b> Deux types de moteurs synchrones intégrables à un véhicule électrique.....	28
<b>Figure 2.3:</b> Référentiel tournant d'axes ( $d-q$ ).....	33
<b>Figure 2.4 :</b> Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle $\alpha$ .....	39
<b>Figure 2.5 :</b> Franchissement de pente.....	42
<b>Figure 2.6 :</b> Franchissement d'obstacles.....	43
<b>Figure 2.7 :</b> Transmission de couple moteur à la roue.....	45
<b>Figure 3.1 :</b> Schéma bloc de simulation de la machine asynchrone.....	48
<b>Figure 3.2:</b> vitesse de rotation .....	49

<b>Figure 3.3:</b> Couple électromagnétique.....	49
<b>Figure 3.4:</b> Courant statorique ( $I_{abc}$ ).....	49
<b>Figure 3.5:</b> Principe de commande par orientation du flux.....	52
<b>Figure 3.6:</b> Analogie de la MAS avec la MCC dans la commande vectorielle.....	53
<b>Figure 3.7:</b> Modèle de la machine.....	57
<b>Figure 3.8 :</b> Découplage par addition des termes de compensation.....	58
<b>Figure 3.9:</b> Commande decouple.....	59
<b>Figure 3.10:</b> Bloc dé fluxage.....	59
<b>Figure 3.11:</b> Représentation de la commande par PI.....	60
<b>Figure 3.12:</b> Schéma bloc de la régulation du courant.....	61
<b>Figure 3.13:</b> Schéma bloc de la régulation de la vitesse.....	62
<b>Figure 3.14 :</b> Schéma de l'onduleur MLI.....	64
<b>Figure 3.15 :</b> schéma bloc de la commande vectorielle de la MAS.....	65
<b>Figure 3.16 :</b> Vitesse de rotation.....	66
<b>Figure 3.17 :</b> Couple électromagnétique.....	66
<b>Figure 3.18:</b> Courants statorique ( $I_{sd}, I_{sq}$ ).....	65
<b>Figure 3.19:</b> Flux rotorique.....	65
<b>Figure 3.20:</b> Schéma bloc sous MATLAB Simulink de VE avec la commande vectorielle.....	67
<b>Figure 3.21 :</b> Les courants ( $I_{sd}, I_{sq}$ ).....	67
<b>Figure 3.22 :</b> La vitesse de rotation.....	68
<b>Figure 3.23 :</b> Couple électromagnétique.....	68
<b>Figure 3.24 :</b> Les courants ( $I_{sd}, I_{sq}$ ).....	69
<b>Figure 3.25 :</b> La vitesse de rotation.....	69
<b>Figure 3.26 :</b> Couple électromagnétique.....	70
<b>Figure 3.24 :</b> Les courants ( $I_{sd}, I_{sq}$ ) .....	70

**Figure 3.25** : La vitesse de rotation.....71

**Figure 3.26** : Couple électromagnétique.....71

# Introduction Générale

## **I Introduction général**

L'économie d'énergie, La protection et la préservation de l'environnement, sont les maîtres mots de ce XXI<sup>e</sup> siècle. C'est un objectif écologique qui ne pourra être atteint sans apporter des changements radicaux au niveau des activités humaines qui sont fortement responsable de la pollution, et de l'accroissement de la consommation d'énergie dont le moyen de transport le plus utilisé par l'homme : la voiture.

Parmi les solutions avancées par les constructeurs automobiles, on retrouve les voitures fonctionnant aux carburants biologiques tels que l'essence à éthanol, celles utilisant l'énergie solaire ou fonctionnant à l'aide d'une batterie, autrement dit, des voitures électriques.

Les voitures électriques sont les véhicules les plus propres, dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique au lieu du carburant qui représente 90% de la pollution dans les villes. Elles sont alors une excellente solution aux problèmes liés à la dégradation de la nature, à moyen et à long terme, elles pourraient remplacer les véhicules thermiques et modifier de manière radicale notre manière de considérer le moyen de transport.

Le véhicule électrique est loin d'être une nouvelle idée, bien au contraire c'est une invention qui date depuis le XIX<sup>e</sup> siècle et qui est améliorée durant les années suivantes, ce qu'on va justement voir dans le premier chapitre ainsi que, quelques généralités sur cette dernière.

Le deuxième chapitre se portera sur la modélisation des différentes parties de la chaîne d'entraînement du véhicule électrique.

Enfin, le troisième chapitre, sera consacré à la simulation des différentes composantes des véhicules électriques à base d'une MAS à cage d'écureuil soumis à un parcours variable.

# **Chapitre I**

## *Généralité sur les véhicules électriques*

## I.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant sur ce vaste domaine qui est la voiture électrique. Nous allons présenter un état de l'art de la voiture électrique (la classification selon l'énergie, le système de puissance), de plus nous nous intéressons aux principaux composants de la chaîne de traction (batteries, motorisation. . .) et nous finirons par souligner les différents avantages et inconvénients des véhicules électriques.

## I.2 Définition

Un véhicule électrique "VE" est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue.

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie, etc. beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces Explorations sont liées à une problématique commune : la production, le transport, le stockage et l'utilisation de l'électricité.

Le système de propulsion électrique (figure 1.1) est l'organe principal du véhicule électrique, ce dernier est propulsé électriquement par des moteurs et comporte un système de transmission formé par un ou plusieurs moteurs électriques entraînant deux roues motrices.[6]

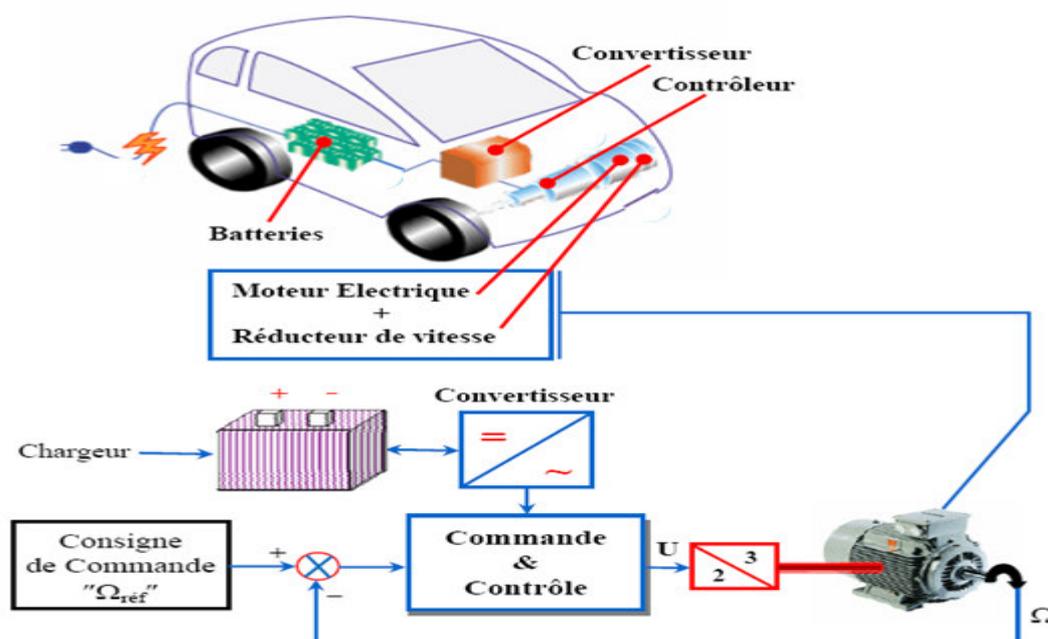


Figure 1.1: Synoptique d'un Système de Propulsion

### **I.2.1 Le Bloc Moteur Electrique**

Le moteur électrique est l'élément indispensable du véhicule électrique, il doit être robuste, fiable et pratiquement sans entretien, ce qui est plus indiqué pour le moteur à induction. Selon le type de propulsion, il peut y avoir un ou plusieurs moteurs. Par ailleurs, différents types de moteurs peuvent être utilisés pour la propulsion, et cela dépend de plusieurs paramètres et contraintes du type de propulsion (véhicule lourd ou léger, faible ou grande puissance, etc.).

### **I.2.2 Le Bloc de Commande et de Contrôle**

Le bloc de commande et de contrôle "Contrôleur" est le cerveau du système de propulsion, son rôle est de capter les informations d'état du système (vitesse de rotation, courants, etc.) de les traiter et d'agir en conséquence pour la génération des signaux de commande, appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie. [2]

### **I.2.3 Le Bloc de Puissance**

Une autre vision sur les systèmes électroniques a émergé, cela est dû à l'évolution des Semi-conducteurs. En effet, les convertisseurs de puissance permettent maintenant d'élargir le champ d'application des machines électriques. Un convertisseur de puissance est un dispositif de puissances qui assure la liaison entre la source "batteries" et la machine à commander en modulant l'énergie disponible pour le besoin.

## **I.3 Technologies émergentes**

### **I.3.1 Véhicules Electriques à Batterie**

Un véhicule électrique à batterie utilise exclusivement l'énergie emmagasinée dans un bloc-batterie du véhicule, rechargé à partir d'un réseau électrique local, qui la fournie, ensuite aux moteurs électriques servant à propulser le véhicule. L'autonomie des véhicules électriques à batterie dépend du type de batterie qui y est installé.

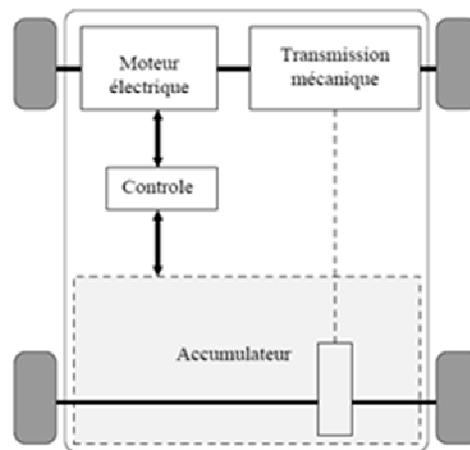


Figure 1.2 : Véhicule électrique à batterie

### I.3.2 Véhicules hybrides

Un système hybride est par définition composé de deux sources d'énergie différentes pour se mouvoir. L'utilisation d'un véhicule hybride qui combine une motorisation électrique et une motorisation thermique, apparaît comme une solution intermédiaire et une alternative intéressante.

Ces combinaisons, bien choisies, peuvent rendre les véhicules hybrides jusqu'à deux fois plus efficaces et, assurent une autonomie comparable aux véhicules conventionnels.

L'adjonction d'un moteur électrique et d'une puissante batterie permet d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique ou de le remplacer momentanément et donc de réduire la consommation et les émissions (en site urbain, le moteur thermique est à l'arrêt "zéro pollution", il est utilisé à des vitesses plus élevées et peut être assisté par le moteur électrique pour les fortes accélérations). D'une manière générale on distingue trois principaux types de systèmes d'entraînement hybride :

- a - Hybride série.
- b- Hybride parallèle.
- c- Le combiné (série-parallèle)

Ces systèmes diffèrent dans leur façon d'intégrer le fonctionnement des deux unités de production d'énergie[3].

#### I.3.2.a Véhicule hybride série

La technologie série sépare complètement la production d'énergie et son utilisation pour l'entraînement des roues. Le véhicule est propulsé entièrement par le moteur électrique (figure 1.3) et le moteur thermique sert à fournir l'énergie électrique. Cette énergie est emmagasinée ou

directement utilisée pour entraîner un ou plusieurs moteurs électriques qui fournissent la puissance nécessaire pour propulser le véhicule. Il n'y a aucun lien mécanique entre les deux moteurs.

Parmi les avantages du véhicule hybride série on cite son autonomie et sa puissance disponible comparable à un véhicule thermique. De plus, cette configuration offre la possibilité d'une gestion globale de l'énergie présente dans le système (thermique et électrique). Enfin, la batterie, largement sous-dimensionnée par rapport au véhicule tout électrique, devient non limitative d'un point de vue énergétique mais aussi permet le mode de fonctionnement à zéro émission. L'inconvénient majeur de cette configuration est l'importance du système de motorisation de même que pour le véhicule hybride parallèle, avec les mêmes conséquences d'augmentation de la masse, du coût et la diminution de la place disponible [3], [4].

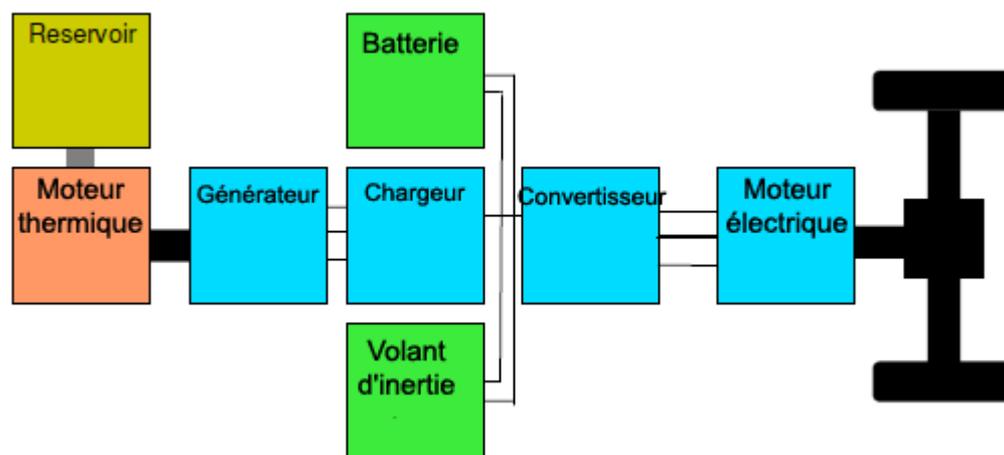


Figure 1.3 : Véhicule hybride Série

### I.3.2.b Véhicule hybride parallèle

Dans cette configuration, le véhicule est équipé d'une double propulsion thermique et électrique (figure 1.4). Les atouts du système parallèle résident dans le fait que l'on peut combiner ou superposer, à bon escient, les deux entraînements, la propulsion est électrique et/ou thermique. Le moteur thermique est utilisé à haute vitesse et le système électrique est utilisé comme appoint pour les accélérations, la récupération et éventuellement sur les côtes et au démarrage.

Le véhicule hybride parallèle a beaucoup d'avantages, parmi lesquels on cite ses performances et son autonomie qui sont comparables à celles d'un véhicule thermique mais surtout son taux d'émission zéro en mode électrique. Toutefois, il présente des inconvénients majeurs à savoir d'une part le poids et l'encombrement élevé, de son système de motorisation et d'autre part, la redondance de fonctionnalités entre ses deux moteurs.

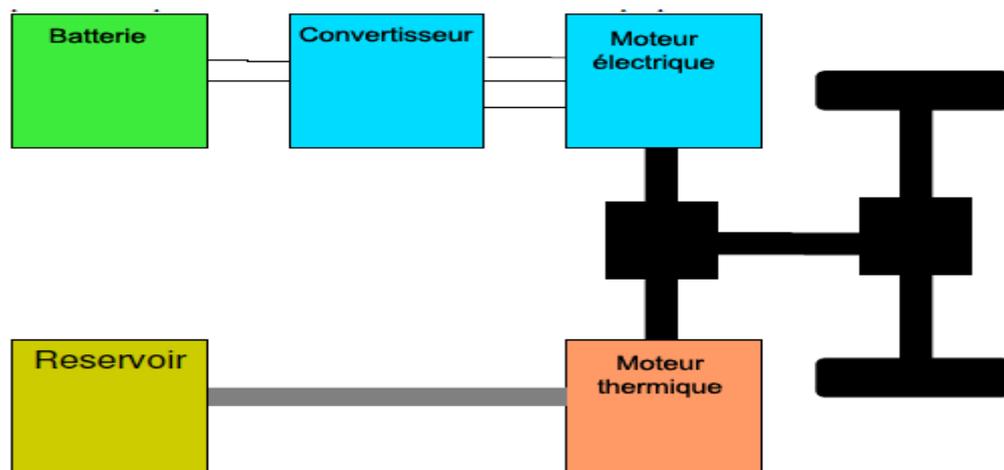


Figure 1.4 : Véhicule hybride Parallèle

### I.3.2.c Véhicule hybride combiné

L'architecture combinée, appelée aussi hybride à dérivation de puissance, permet de combiner les avantages des structures série et parallèle. Cette structure présente un lien mécanique de plus entre le moteur thermique et la transmission par rapport à l'hybride série et une génératrice électrique est ajoutée entre le moteur thermique et le convertisseur de puissance par rapport à l'architecture parallèle comme le montre la (figure 1.5). Les puissances sont donc combinées en deux nœuds : l'un électrique et l'autre mécanique.

En 1998, Toyota produit, sur ce principe, le premier véhicule hybride (Prius) équipé d'un moteur thermique qui est accouplé à un générateur électrique à aimants associé à une batterie d'accumulateur Ni-MH, il est également accouplé à un moteur électrique d'une puissance crête de 33 kW.[3].

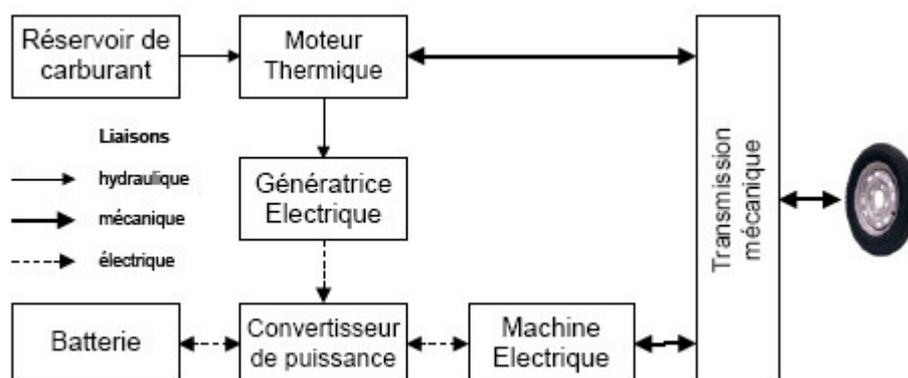


Figure 1.5 : Véhicule hybride combiné

## I.4 Solution de transmission mécanique dans une chaîne de traction tout électrique

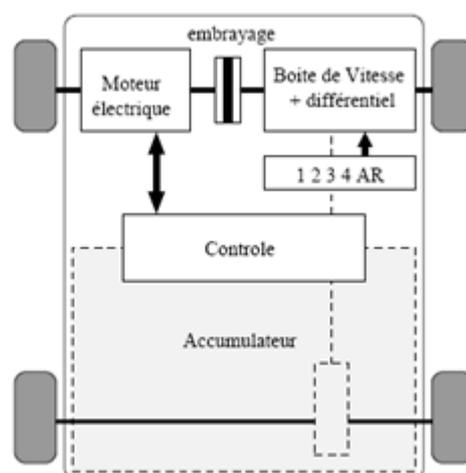
L'objet de la transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le ou les moteurs électriques, aux roues motrices du véhicule ; il s'agit d'adapter la vitesse et le couple du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule.

Nous pouvons envisager plusieurs possibilités d'associations d'éléments nécessaires à la transmission de la puissance qui sont le réducteur mécanique, la boîte de vitesses (BV) et éventuellement le différentiel. Le choix du réducteur est intimement lié, au type de véhicule et au choix du moteur qui a un volume et une masse principalement fonctions de son couple. Pour réduire la masse embarquée et le coût de la motorisation, on préfère généralement associer le moteur à un réducteur mécanique.

Cela permet de réduire le couple que doit fournir le moteur en augmentant sa vitesse de rotation. Il doit être parfaitement adapté aux exigences fonctionnelles du véhicule.

### I.4.1 Solution avec boîte de vitesse mécanique

L'avantage essentiel de cette solution est de permettre l'utilisation d'un moteur à plus faible couple, donc plus léger, pour une vitesse maximale donnée. Remarquons qu'entre deux changements de vitesse (petite plage), si le moteur possède une capacité de fonctionnement à puissance maximale constante, cela peut permettre également la suppression des fluctuations de puissance. La figure (Figure 1.6) montre cette solution.

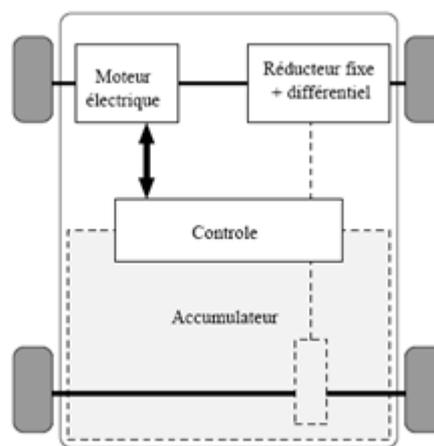


**Figure 1.6 :** Solution monomoteur avec boîte de vitesse

### I.4.2 Solution avec réducteur mécanique à rapport fixe

Le couple maximal que doit délivrer un tel moteur associé à un réducteur de rapport fixe est supérieur à celui que devrait produire un moteur associé à une boîte de vitesses.

Cette solution est illustrée sur la figure (Figure 1.7).



**Figure 1.7 :** Solution monomoteur avec réducteur fixe

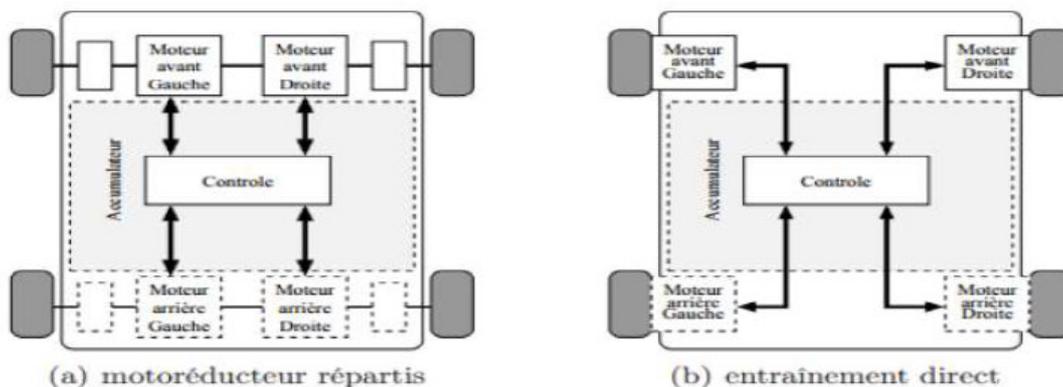
En effet, les rapports courts aux basses vitesses permettent d'accroître le couple aux roues. Le couple est une grandeur très dimensionnelle et l'absence de boîte de vitesses se paie par un moteur plus lourd, plus encombrant et plus coûteux. Malgré tout, c'est la solution qui est quasi universellement retenue.

### I.4.3 Solutions multi-moteurs

Il peut a priori sembler intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme le différentiel et les doubles joints de cardans, nécessaires dans les deux solutions précédentes. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte de vitesses et de l'embrayage, vers la simplification de la chaîne de transmission mécanique. On peut ainsi réaliser des solutions à deux roues motrices soit à l'avant, soit à l'arrière ou encore des solutions à quatre roues motrices.

Lorsque les moteurs sont sur les roues directrices, une très grande sécurité de contrôle est requise, ils ne doivent en aucun cas se bloquer lors d'une défaillance. Les moteurs peuvent être associés à un

réducteur fixe (il n'est plus possible ici d'avoir une boîte de vitesses) pour accroître le couple massique (Figure 1.8-a) ; ils peuvent également entraîner directement la roue dans laquelle ils sont alors intégrés (Figure 1.8-b). Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir recours à des moteurs à très fort couple massique et généralement à rotor extérieur.



**Figure 1.8 :** Motorisation Multi-moteurs

Le moteur-roue intègre un moteur électrique et d'autres composants dans une configuration compacte qui peut s'insérer dans une roue de dimensions ordinaires. Les convertisseurs de puissance peuvent être installés soit à l'intérieur soit à l'extérieur de la roue. Il est montré sur la (Figure 1.9) à quoi ressemble ce type de moteur. Ce système permet d'une part de contrôler avec haute précision et indépendamment le couple appliqué à chaque roue et d'autre part de maximiser la capacité du freinage régénérateur. L'utilisation de ce type de moteur sur des roues directrices, permet la suppression de toutes les parties mécaniques liées à la transmission (différentiel, boîte de vitesse, embrayage, etc..), de commander indépendamment les roues et en même temps, de libérer de l'espace dans le véhicule, notamment utilisable par les batteries [1].

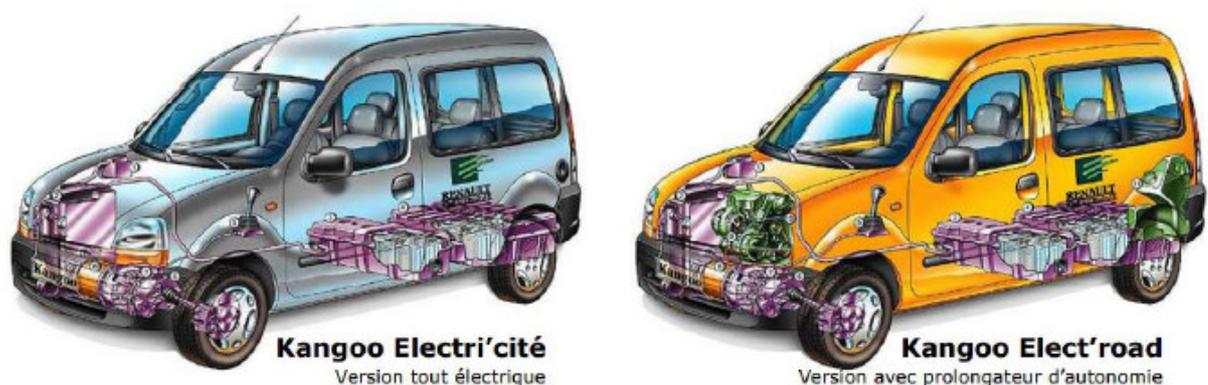


**Figure 1.9 : Moteur Roue**

Cette grande liberté permet un contrôle indépendant du couple ce qui peut améliorer la sécurité de transport. Les inconvénients de ce type de moteur sont la difficulté d'intégrer un réducteur. Ainsi, l'introduction d'un moteur à fort couple dans la roue peut avoir tendance à déstabiliser le véhicule. Enfin, il se pose aussi le problème du freinage, d'une part il faut intégrer au moteur roue le disque de frein et d'autre part il faut tenir compte des échauffements supplémentaires dus à la dissipation d'énergie calorifique lors des phases de freinage.

Un exemple de voiture commercialisée en France depuis 2003, ayant un système ressemblant fort à la configuration série est la Renault Kangoo Elect'Road, présentée sur la (figure 1.10). En effet, la configuration série (la Kangoo Elect'Road) provient d'une évolution de la Kangoo Electri'cité, véhicule entièrement électrique.

Ainsi, équipé d'un générateur électrique qui autorise le rechargement des batteries en roulant et permet d'augmenter l'autonomie de 90 à 180 Km à partir d'un cycle européen urbain[7].



**Figure 1.10 : Renault Kangoo Electri'Cité et Elect'Road**

## I.5 La chaîne de traction électrique

La chaîne de traction électrique est l'organe principal du véhicule électrique.

### I.5.1 Le moteur électrique d'entraînement

Le moteur électrique est l'élément indispensable du véhicule électrique. Les fabricants des VE emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de traction. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que :

Le moteur à courant continu (MCC), à induction (MAS), synchrone à aimant permanent (MSAP), à reluctance variable (MRV) etc. Certains des modèles du VE utilisés par différentes compagnies sont énumérés ci-dessous (Tab 1.1), avec le type du moteur utilisé.[8]

Compagnie	Modèle du VE	Moteur
Fiat	Fiat Panda Electra	M.C.C. à excitation Série
Fiat	Fiat Seicento	Moteur à Induction
Honda	Honda EV plus	MSAP
Mazda	Mazda Bongo	M.C.C. à excitation Shunt
Nissan	Nissan Altra	MSAP
Toyota	Toyota RAV 4	MSAP
General	GM EV1	Moteur à Induction
Ford	Ford Think City	Moteur à Induction

**Tab1.1** : Différents Modèles des Véhicules Electriques

Chacun des moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté de la commande qui s'affrontent :

- **Le moteur synchrone aimant permanent (MSAP):** offre la plus grande efficacité des trois moteurs, sur toute la gamme de vitesses et les densités de puissance les plus élevées, ce qui se traduit par un encombrement plus réduit.

Par contre, des inconvénients sont aussi à considérer dans l'emploi de ce genre de machine. Tout d'abord, les aimants sont construits avec des éléments de terres rares dont l'acquisition pose des problèmes économiques, politiques et écologiques. En plus, les aimants réduisent la fiabilité du moteur par les effets de démagnétisation que peuvent apparaître dans le cas d'une utilisation en dehors des limites prévues.

L'échauffement se produit surtout dans le rotor (dans les aimants); ainsi la diffusion de la chaleur est plus difficile à faire. Un dernier inconvénient pour ce type de moteur est lié au cycle de fonctionnement du véhicule, et plus exactement aux phases de fonctionnement à vide.

L'excitation du moteur doit être maintenue même dans ces périodes, entraînant des pertes Supplémentaires dans les parties ferromagnétiques.

➤ **Le moteur asynchrone à cage :** offre un couple et un rendement comparables aux moteurs à aimants permanents, surtout dans la gamme des hautes vitesses.

L'avantage principal de ce type de moteur par rapport aux moteurs synchrones est l'absence des aimants et la construction simple. La gamme des vitesses à puissance constante est très large et donc le moteur est bien adapté pour des applications de traction. L'avantage majeur du moteur asynchrone est représenté par son prix très réduit, suite à son degré d'intégration dans le marché. Toutefois, le grand nombre des spires dans le bobinage et la présence de la cage rotorique augmentent les pertes Joules et la masse totale du moteur.

Aussi, l'échauffement de ce type de moteur est important. Dans la gamme des basses vitesses.

➤ Par comparaison, **le moteur à reluctance variable (MRV)** à une construction très simple. Cela se traduit par une fiabilité élevée, un prix de construction réduit (52% par rapport au prix du moteur asynchrone et seulement 30% par rapport au moteur synchrone à aimants permanents) et un poids réduit (85% du poids du moteur à aimants et 73% du poids du moteur asynchrone). La localisation de l'échauffement dans le stator plutôt que dans le rotor facilite l'évacuation de la chaleur et élimine la nécessité des systèmes de refroidissement supplémentaires.

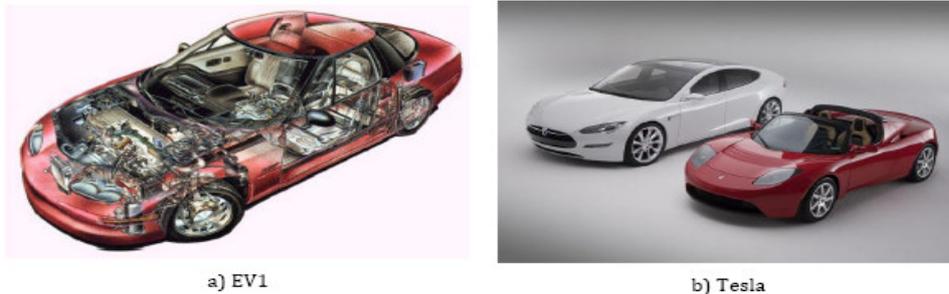
Néanmoins, la densité de puissance et l'efficacité du moteur, qui sont inférieures, doivent être attentivement adressées depuis la phase de conception. Finalement, les ondulations de couple et les effets acoustiques du moteur sont des inconvénients spécifiques de la MRV.

Le coût de la partie d'alimentation est relativement élevé par rapport aux autres solutions.

L'onduleur normalement utilisé (en demi-pont asymétrique) n'est pas disponible sous une forme industrielle ce qu'entraîne une augmentation du prix du système de traction. [9]

Notre choix est porté sur un moteur à induction pour un véhicule urbain. D'une part, cette machine est la plus utilisée dans les applications industrielles où la variation de vitesse, une haute précision

de régulation et de hautes performances en couple sont requises. D'autre part, c'est parce qu'il bénéficie de la plus grande expérience en matière de moteurs électriques, il est souvent retenue pour la motorisation des automobiles électriques est commence à être utilisée dans les chariots à manutention.



**Figure 1.11** : véhicules électriques avec moteur asynchrone

### I.5.2 La source d'énergie

Le stockage de l'énergie électrique est le problème majeur du véhicule électrique. Dans cette partie, nous présenterons de manière succincte deux voies technologiques possibles : les batteries et les piles à combustible. Ces éléments permettant de stocker de l'énergie doivent remplir les conditions suivantes [10] :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids en W/kg) permettant de bonnes accélérations.
- Une bonne énergie massique (en Wh/kg) étant synonyme d'une bonne autonomie.
- Une durée de vie ( $DV_{bat}$ ) : définit le nombre de batterie utilisée durant la vie du véhicule. Deux types de durées de vie sont à considérer :

1. **La durée de vie calendaire** : capacité de la batterie à résister aux dégradations dues à l'usage et au temps. Elle dépend de la fréquence d'utilisation, et en moindre mesure, de la température et de l'humidité. Elle est donnée en année.

2. **La durée de vie cyclique** est le nombre de charges / décharges que la batterie peut supporter. Elle est liée à la profondeur de décharge imposée à celle-ci.

La durée de vie calendaire est une donnée figée, alors que la durée de vie cyclique dépend de la fréquence de recharge du véhicule et donc de l'usage de son propriétaire.

La durée de vie de la batterie ( $DV_{batieter}$ ) est égale au minimum entre ces deux durées de vie :

$$DV_{batieter} = \min(DV_{calendair}, DV_{cyclique})$$

- Disposer d'un faible entretien et constituer d'éléments facilement recyclables.
- Le temps de recharge (en h) : il dépend du type de recharge mise en oeuvre (charge normale ou charge rapide)
- La sécurité: un système électronique doit permettre la gestion de la batterie (température, vitesse de charge /décharge, etc ...) pour éviter tout dysfonctionnement pouvant impacter la sécurité.
- Le cout: Les couts des batteries de VE équipées des chimies les plus performantes sont aujourd'hui importants. Les constructeurs comptent sur une augmentation des volumes de production pour en diminuer les coûts.

### I.5.2.1 Les différentes technologies de batteries envisageables

Plusieurs chimies de batterie sont aujourd'hui envisagées pour les VE, chacune ayant des caractéristiques propres. Ces technologies diffèrent dans leur mode de production, d'élimination, mais aussi en termes de performance lors de la phase d'utilisation :

#### ➤ Batteries Plomb-acide

La technologie Plomb-acide est la technologie de batterie la plus ancienne. Elle est largement utilisée dans le monde industriel, en particulier pour les chariots élévateurs type Fenwick, Cette technologie présente deux avantages importants : son coût relativement faible et son recyclage aisé. Elle a en contrepartie une densité énergétique faible (environ 30Wh/kg), qui implique une masse de batterie importante pour obtenir une autonomie acceptable pour un véhicule. Enfin, sa durée de vie est courte, elle est toutefois être envisagée pour de petits véhicules limités à de faibles vitesses et à usage exclusivement urbain.

#### ➤ Batteries Alcalines

Les batteries Alcalines comprennent les batteries Nickel-Cadmium, Ni-Métal-Hydrure, etc. Ces technologies sont chères, mais équipent la plupart des véhicules roulant aujourd'hui.

#### - Nickel-Cadmium

Cette technologie a des nombreux avantages : elle est robuste et présente des performances (densité énergétique et densité de puissance) correctes, et une filière de recyclage déjà existante. Elle demeure toutefois une technologie très onéreuse, et son rendement est sensible aux variations de température.

### -Nickel-Métal Hydrure

La technologie Nickel-Métal Hydrure a des performances comparables à celle du Nickel-Cadmium. La différence tient aux alliages particuliers qui sont utilisés à la place du cadmium. Son désavantage est la limitation en densité énergétique et en densité de puissance. Il s'agit d'une technologie mature et éprouvée industriellement et les améliorations possibles sont faibles. On n'espère plus baisser les coûts en augmentant la production.

#### ➤ Batteries Lithium

Du fait de sa densité énergétique importante, de l'absence d'effet mémoire et de leur faible autodécharge, cette technologie de batterie est présentée comme la solution pour les VE du futur. On la retrouve dans de nombreux prototypes qui annoncent les plus fortes autonomies. Elle se décline en deux technologies principales :

⇒ le Lithium-ion, qui équipera les véhicules Renault, Micro-car, Peugeot, etc. Il en existe une grande variété : Lithium manganèse, Lithium fer phosphate, etc.

⇒ le Lithium polymère qui équipera la Blue-car développée par Bolloré.

Ces batteries de véhicules ne sont pas encore vraiment produites en série et de nombreuses Optimisations sont à apporter quant à la durée de vie, la sécurité, les coûts de production, etc.

Il existe de nombreuses autres chimies de batteries dont les performances sont différentes. De plus, du fait de leur caractère prospectif, il y a peu de retour d'expérience sur les batteries les plus prometteuses (Lithium-ion), et des incertitudes demeurent quant à leur durée de vie dans le véhicule et leur sécurité.

Différentes chimies de batteries seront considérées dans ces travaux, dont les performances diffèrent : le plomb-acide, le nickel-métal-hydrure, et le lithium-ion. Le choix a également été fonction de l'importance des données recueillies pour chaque technologie identifiée

Le tableau ci-dessous présente quelques chiffres permettant de situer les différentes technologies de batteries :

Technologie	Energie massique (Wh /kg)	Puissance massique (W/kg)	Nombre de cycles	Rendement (%)	Coût estimé (euros / kWh)
Plomb	35-50	150-400	500-1000	80	64-95
Nickel-cadium	30-50	100-150	1000-2000	75	250-350
Nickel-hydrure de metal	60-80	200-300	1000-2000	70	200-350
Lithium-ion	80-200	200-300	1000	> 95	500-1500

Tab 1.2 : Technologies des batteries

### I.5.2.2 Pile á combustible

Une pile á combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible (hydrogène, méthanol, etc.) en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé. Le principe de fonctionnement d'une pile á combustible se résume dans une combustion électrochimique, contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur á évacuer selon une réaction chimique globale universellement connue.

Une cellule élémentaire est constituée de 3 éléments[11], [12] :

1. deux électrodes,
2. un électrolyte.

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène)

Le fonctionnement global d'une pile á combustible est décrit sur la figure1.13 .une réaction d'oxydoréduction (en présence de platine) fait réagir l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur selon les équations chimiques suivantes :



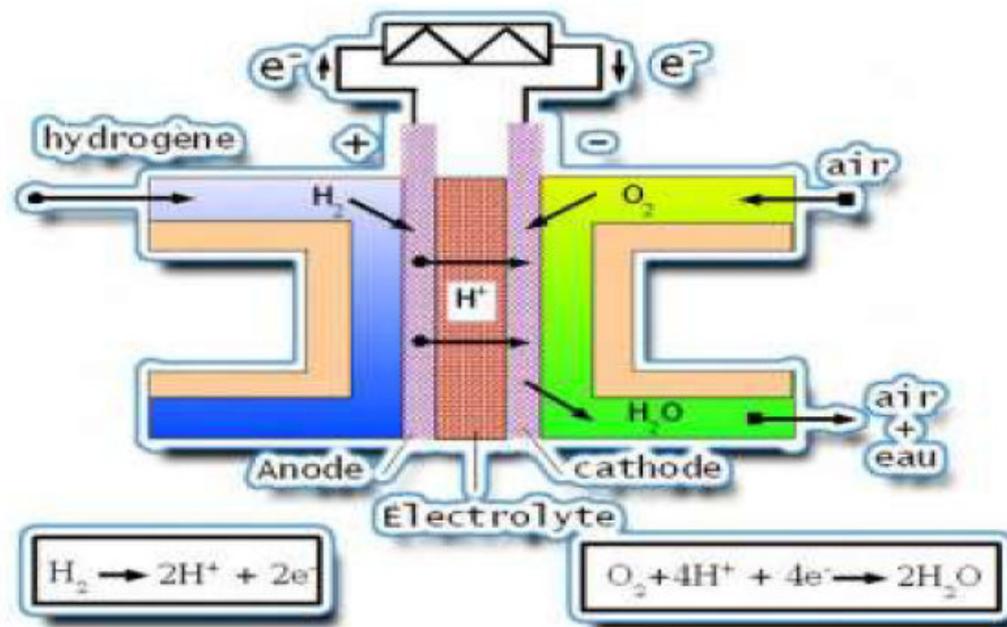


Figure 1.12 : Production de l'électricité dans une pile à combustible

### I.5.3 le super condensateur

Présent une énergie massique plus faible que celle de la batterie mais une densité de puissance plus importante, ainsi cette source d'énergie est plus réactive aux demandes de fortes puissance mais ne permet pas d'accumuler beaucoup d'énergie, son nombre de cycles de charge/décharge est très élevé comparé à celui d'une batterie.

Il délivrera la puissance instantanée nécessaire aux fortes accélérations, quand les batteries seront lentes à répondre [3].

### I.5.4 Les convertisseurs statiques

#### I.5.4.1 Les redresseurs (AC-DC)

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution général, 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 et/ou dans le super condensateur .

#### I.5.4.2 Les hacheurs (DC-DC)

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

- ✓ Ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu.
- ✓ Ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc.).

En effet, on ne peut envisager le branchement brutal d'un moteur à courant continu sur une source d'énergie à tension fixe (batterie d'accumulateur par exemple) pour les raisons suivantes :

- Aucun réglage du couple moteur ni de la vitesse du moteur ne serait possible.
- Le régime transitoire à la mise sous tension directe du moteur serait destructif tant du point de vue électrique (surintensité) que mécanique (sur couple).

L'utilisation d'un hacheur permet en effet de maintenir le courant moteur à la valeur souhaitée tout en assurant le réglage progressif et sans perte notable de la tension du moteur. Il permet également de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

#### I.5.4.3 Les onduleurs (DC-AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le (ou les) moteur(s) de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule. La conversion DC-AC peut être réalisée de multiples manières. Mais l'usage, les particularités des véhicules routiers et la rationalisation des solutions industrielles ont conduit à privilégier une structure d'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constitués par l'association d'un IGBT et d'une diode montés en antiparallèle et commandés selon une loi du type MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsion, en anglais (PMW)). Ce type de montage permet d'associer une source de tension (de type batterie) et un récepteur de type source de courant (moteur asynchrone, moteur synchrone bobiné, à aimant permanent ou à réluctance variable). La méthode de commande par MLI présente deux avantages importants:

- ✓ Elle repousse vers les fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie ce qui facilite le filtrage de cette tension ;
- ✓ Elle permet de faire varier le fondamental de la tension de sortie. [13]

## I.6 La puissance nécessaire pour tracter le véhicule

En se basant sur les principes de la mécanique et de l'aérodynamique du véhicule, on peut évaluer la puissance de transmission et l'énergie nécessaires pour assurer le fonctionnement du véhicule (figure 1.13),[12].

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

$$F_t = F_{ro} + F_{cr} + F_{sf} + F_{aéro} \quad (I.1)$$

La force de résistance de roulement  $F_{ro}$  est produite par le pneu au contact de la surface de la chaussée :

$$F_{ro} = C_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (I.2)$$

$C_{rr}$  : est un coefficient non linéaire dépendant de la vitesse du véhicule, du type et de la pression du pneu, et du trajet de la route. Il augmente avec la vitesse du véhicule et également durant ces manœuvres. La force de résistance de roulement peut être minimisée en maintenant les pneus aussi gonflés que possible.

Par ailleurs, la charge due aux frottements pneu-route est donnée par :

$$F_{sf} = K_a \cdot v_{véh} \quad (I.3)$$

La force aérodynamique  $F_{aéro}$  due à la résistance de l'air est quant à elle donnée par :

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \rho_{air} S_f C_{px} (v_{véh} - v_{vent})^2 \quad (I.4)$$

Enfin, la force de montée ( $F_{cr}$  avec un signe +) et la force de descente ( $F_{cr}$  avec un signe -) est donnée par :

$$F_{cr} = \pm m_v g \sin \alpha \quad (I.5)$$

La force de traction d'un véhicule électrique est assurée par le moteur électrique qui doit surmonter la charge de la route. L'équation du mouvement est alors donnée par :

$$K_a m_v \frac{dv}{dt} = F - F_t \quad (I.6)$$

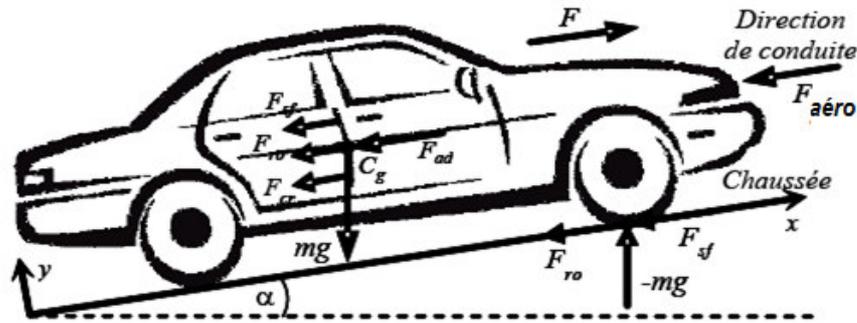


Figure 1.13 : forces élémentaires agissant sur un véhicule.

La force  $(F - F_t)$ , accélère le véhicule (ou le décélère quand  $F_t$  excède (dépasse)  $F$ ). La puissance nécessaire pour déplacer le véhicule doit alors compenser la charge  $F_t$  de la route.

$$P_m = F_t v_{\text{véh}} \quad (I.7)$$

L'équation mécanique qui décrit la commande de chaque roue est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + K_f \omega_m + C_r = C_m \quad (I.8)$$

Le couple résistant est donné par :

$$C_r = \frac{C_{rrou}}{i} = \frac{R_{rou}}{i} \cdot F_t \quad (I.9)$$

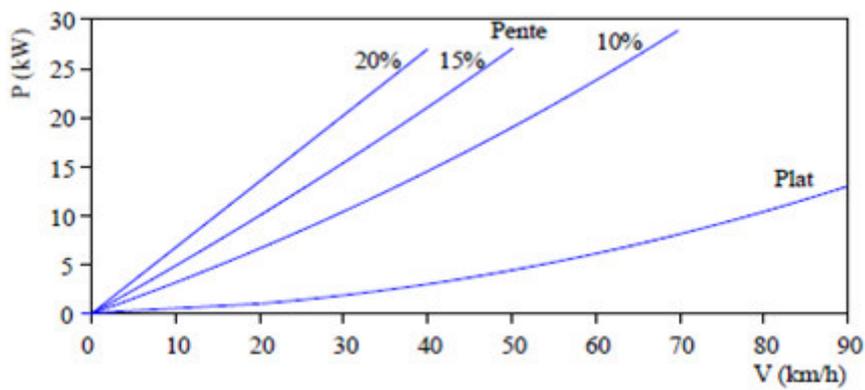
Enfin, le moment d'inertie global du véhicule est donné par :

$$\begin{cases} J = J_{rou} + J_v \\ J_v = \frac{1}{2} m_v \left( \frac{R_{roue}}{i} \right)^2 (1-\lambda) \end{cases} \quad (I.10)$$

Si le coefficient d'adhérence de la surface de la trajectoire est très grand, alors  $\lambda$  est généralement faible et peut être négligé

La figure (1.14) montre l'évolution de la puissance requise en fonction de la vitesse stabilisée, pour l'entraînement d'un véhicule urbain (masse en charge de 1150kg)

$C_{roul} = 150 \times 10^{-4}$ ,  $S = 2.5m^2$ ,  $C_{px} = 0.32$ ) en palier et en pente à  $p\%$ .



**Figure 1.14 :** Puissance requise aux roues pour une voiture urbaine à vitesse stabilisée

Le tableau (Tab. 1.3) résume les ordres de grandeur de la puissance maximale nécessaire pour les différentes catégories de véhicules. [1]

Type de véhicule	Puissance maximale
Bicyclette assistée	100 à 400 W
Scoter	2 kW
Motocyclette sportive	14 à 25 kW
Voiturette	8 kW
Voiture urbaine	20 à 40 kW
Voiture routière	50 à 70 kW
Véhicule utilitaire urbain	40 kW
Bus urbain	160 kW

**Tab 1.3 :** Puissance maximale nécessaire pour divers véhicules

## I.7 Avantages et inconvénient des véhicules électriques

### I.7.1 Avantages

La voiture électrique possède plusieurs avantages qui permettront aux consommateurs de faire à terme la différence entre les véhicules électriques et les véhicules thermiques :

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

### I.7.2 Inconvénients

Comme la voiture électrique possède plusieurs avantages, elle a aussi des malle-faits :

- Question autonomie.
- Sans oublier que la voiture se doit d'être la plus légère possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps.
- D'autant que comme les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures devrait être élevé.

- Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas de chaleur. L'habitacle de la voiture n'est pas chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.
- La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes.

### **I.8 Conclusion**

Dans cette première partie, Nous avons donné des définitions et généralités sur la traction électrique afin de choisir la configuration et la puissance nécessaire pour un véhicule urbain ; le modèle choisi tient en compte les différentes contraintes rencontrées pour un véhicule réel.

Les ordres de grandeur des puissances maximales données dans le tableau (Tab 1.6) permettent de constater qu'il est possible de réaliser une motorisation électrique sur de nombreux véhicules. Si des accélérations importantes sont souhaitées, il faut bien entendu, accroître la puissance, sachant que la puissance maximale est une contrainte importante de conception, à la fois pour les batteries et pour le (ou les) moteur(s) et son (leurs) alimentation(s) électrique(s). L'objet de la transmission de puissance mécanique est de relier la source d'énergie, le ou les moteurs électriques, aux roues motrices du véhicule, il s'agit d'adapter la vitesse de rotation et le couple  $C_{em}$  du moteur aux exigences fonctionnelles du véhicule, c'est-à-dire le couple résistant à la roue.

# Chapitre II

*Modélisation des  
différentes parties de  
la chaîne  
d'entraînement du  
véhicule électrique*

### II.1 Introduction

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 VE 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.

Dans ce chapitre, la modélisation des différents composants de la chaîne de traction d'un véhicule électrique est présentée.

### II.2 Description de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un véhicule électrique est l'ensemble des éléments, depuis la source d'énergie jusqu'à la transmission mécanique, qui assurent la fourniture d'une puissance mécanique capable de mouvoir le véhicule. Comprend la batterie haute tension, la machine électrique et le(s) convertisseur(s) de puissance permettant le pilotage de la machine (Figure 2.1).

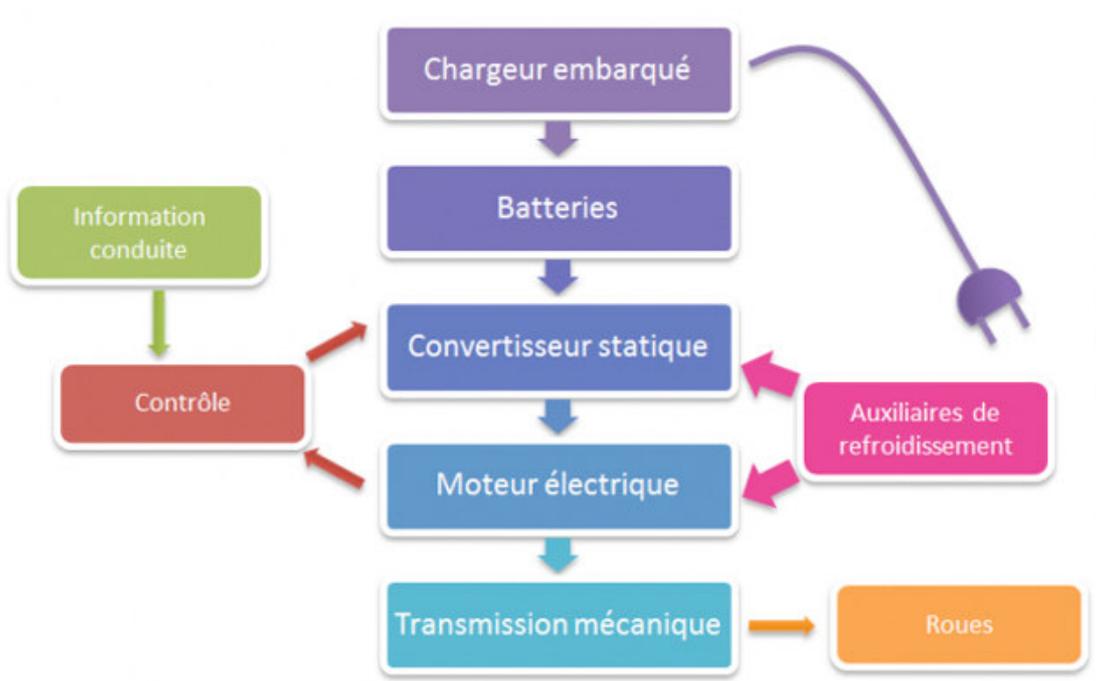


Figure 2.1 : Chaîne de traction d'un véhicule électrique.

---

### II.2.1 Le moteur électrique d'entraînement

Un moteur électrique est une machine électromécanique capable de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Les moteurs électriques sont de plus en plus utilisés dans un grand nombre d'applications l'automobile, l'aéronautique, l'automatisation et bien d'autres encore. Ils sont suffisamment compacts pour être installés pratiquement partout, leur potentiel d'économie d'énergie est énorme, ils fournissent de l'énergie sur demande, sont directement contrôlables et leur maintenance est aisée [14]. Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé. Le véhicule électrique, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries [15].

Nous allons donc présenter les différents moteurs d'entraînement et leurs fonctionnements.

#### II.2.1.1 Les différents moteurs d'entraînement

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le Moteur à Courant Continu (MCC), moteur asynchrone (Mas), moteur Synchrone a Aimant Permanent (MSAP) [15] etc.

Le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes

- Assurer un démarrage en cote du VE (couple élevé),
- Obtenir une vitesse maximale,
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).

#### II.2.1.2 Le moteur à courant continu(MCC) :

La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, le choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les

---

entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en générale, les 0,3 à 0,5 kW/kg, alors que celle des moteurs à essence est de l'ordre 0,75 à 1,1 kW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application [16].

#### II.2.1.3 Moteur à courant alternatif

L'avancement récent en technologie a rendu les entraînements utilisant les moteurs alternatifs beaucoup plus préférables que les entraînements traditionnels avec courant continu. Car étant plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup élevé, une fiabilité plus grande, et ils ont également besoin de moins courant continu. Ces facteurs son d'importance primordiale pour un système de propulsion de véhicule électrique [19]. Dans ce cas, deux principaux types de moteurs peuvent se discerner :

##### -Le moteur asynchrone

Le moteur asynchrone alimenté dans un véhicule électrique par un onduleur triphasé, il est formé d'un stator et d'un rotor :

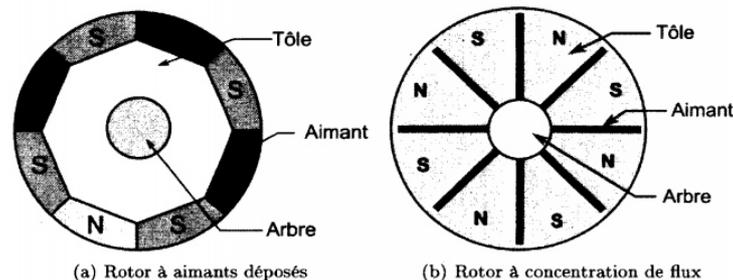
- **Stator** : la partie fixe du moteur. Il comporte trois bobinages (ou enroulements) qui peuvent être couplés en étoile ou en triangle selon le réseau d'alimentation.
- **Rotor** : la partie tournante du moteur. Cylindrique, il porte soit un bobinage (d'ordinaire triphasé comme le stator) accessible par trois bagues et trois balais, soit une cage d'écureuil non accessible, à base de barres conductrices en aluminium. Dans les deux cas, le circuit rotorique est mis en court-circuit (par des anneaux ou un rhéostat [16]).

La machine asynchrone, du part sa simplicité de fabrication et d'entretien est actuellement la machine la plus répandue dans le secteur industriel et présente de bien meilleures performances que les autres types de machines. Le contrôle vectoriel

permet d'obtenir de bonnes performances de l'arrêt aux vitesses élevées et, associé à un contrôle approprié du flux, le rendement peut être optimisé. Son rendement est moins bon que celui des moteurs synchrones car il "faut" des pertes Joule au rotor pour avoir du couple, c'est son principal inconvénient [17].

### -Le moteur synchrone

Le moteur synchrone se compose comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor. Le moteur synchrone est une option particulièrement adaptée au véhicule électrique. Cela est principalement dû à sa grande puissance massique obtenue grâce à l'emploi d'aimants permanents (Fer-Néodyme) au niveau du rotor. Comme le montre la (figure 2.2), deux types de moteurs synchrones à aimants permanents sont utilisés, l'un est à aimants déposés l'autre à concentration de flux [18].



**Figure 2.2 :** Deux types de moteurs synchrones intégrables à un véhicule électrique.

L'avantage de monter les aimants à l'intérieur du rotor est que les saillances ajoutent un couple de réluctance qui permet d'avoir une large plage de vitesse à puissance constante. L'utilisation d'aimants permanents augmente le coût des machines synchrones par rapport à celles asynchrones.

### II.3 modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Vu la forte utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, et la présence de certaines contraintes qui nous pousse à ne pas utiliser de capteurs (à savoir la cherté de ces capteurs, inaccessibilité, et l'encombre des appareils), il serait un bon exemple d'application de la modélisation, de l'estimation et de la commande par observateur d'état.

Par définition, la modélisation d'un système consiste à prédire sa réponse à une excitation donnée. Le but alors est de trouver des relations mathématiques entre les variables d'entrée et de sortie. Afin de pouvoir développer de telles relations, on a maintenu l'ordre de modèle du système à quatre (4) dont on a supposé que le système est linéaire et non dépendant de la variation de la vitesse qui est prétendue fixe.

### II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Les modèles de la machine asynchrone qui sont abordé dans ce chapitre s'appuient sur les principales hypothèses simplificatrices suivantes.

- \* Le circuit magnétique n'est pas saturé, il est parfaitement feuilleté au stator et au rotor, seuls les conducteurs sont parcourus par des courants (les courants de Foucault sont négligés)
- \* La densité du courant est uniformément répartie sur la section des conducteurs (l'effet de peau est négligé).
- \* Les paramètres ne varient pas avec la température.
- \* La force magnétomotrice créée par chaque phase des deux armatures est à répartition spatiale sinusoïdale le long de l'entrefer (on ne considère que le premier harmonique d'espace).
- \* Parfaite symétrie de la machine et entrefer lisse.

Il en résulte, des inductances propres constantes et des inductances mutuelles qui sont des fonctions sinusoïdales de l'angle que font les axes magnétiques.

### II.3.2 Equations de la machine asynchrone triphasée

#### II.3.2.1 Equations électriques

$$[v_s] = \frac{d}{dt} [\varphi_s] + [R_s][i_s] \quad (\text{II.1})$$

$$[v_r] = \frac{d}{dt} [\varphi_r] + [R_r][i_r] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix},$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où :

$[v_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^t$  : Tension instantanée aux bornes des enroulements statoriques.

$[v_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^t$  : Tension instantanée aux bornes des enroulements rotorique.

$[i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$  : Courant dans les phases des enroulements statoriques.

$[i_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t$  : Courant dans les phases des enroulements rotoriques.

$[\varphi_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^t$  : Flux totalisés instantanés traversant les enroulements statoriques.

$[\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^t$  : Flux totalisés instantanés traversant les enroulements rotoriques.

### II.3.2.2 Equation des flux

Les flux totaux des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous forme :

$$[\varphi_s] = [l_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \tag{II.3}$$

$$[\varphi_r] = [l_r][i_r] + [M_{sr}][i_s] \tag{II.4}$$

L'isotropie et la symétrie de la machine fait que les inductances propres des phases statoriques sont égales, il en est ainsi de même pour celles du rotor.

Les matrices «  $L_s$  » et «  $L_r$  » s'écrivent alors:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$l_s, l_r$  : inductances propres statoriques et rotoriques ;

$m_s$  : inductance mutuelle entre phases statoriques ;

$m_r$  : inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire  $\theta$  entre l'axe du stator et celui du rotor, elle s'écrit :

$$[M_{sr}] = m_s \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$M_{sr}$  : inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

### II.3.2.3 Equation mécanique :

L'étude des régimes transitoires fait intervenir en plus des grandeurs électriques (tensions, courants), les grandeurs mécaniques (vitesse, couple, inertie, frottements). Lorsque la vitesse angulaire est constante, le couple résistant appliqué (y compris celui des frottements) à l'arbre de la machine asynchrone est équilibré par le couple électromagnétique et l'équation d'équilibre des couples s'écrit :

$$\frac{Jd\Omega}{pdt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (\text{II.6})$$

$J$  : inertie de toutes les masses tournantes ramenées au rotor de la machine ;

$C_{em}$  : couple électromagnétique ;

$\Omega$  : vitesse angulaire mécanique du rotor ;

$C_f$  : couple dû aux frottements du système d'entraînement ;

$C_r$  : couple mécanique de la charge.

### II.3.3 Transformation de Park

La transformation de Park est une opération mathématique qui permet de passer d'un système triphasé quelconque (a, b, c) décalés respectivement les un par rapport aux autres d'un angle électrique de  $\frac{2\pi}{3}$ , en un système à trois axes orthogonaux (d,q,o). En fait, ce n'est rien d'autre qu'un changement de base pour les axes magnétiques du système.

La transformation directe est la suivante :

$$[p(\theta_s)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta_s) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

La transformation directe de Park s'écrit :

$$[X'_d, X'_q, X'_o] = [A][X'_a, X'_b, X'_c] \quad (\text{II.9})$$

Et la transformation inverse s'obtient :

$$\begin{bmatrix} X'_a \\ X'_b \\ X'_c \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} X'_d \\ X'_q \\ X'_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$[X'] = ([i], [v], [\phi])$  où ces composantes sont respectivement le courant, la tension et le flux.

Dans le cas où le neutre de la machine n'est pas relié ( $i_a + i_b + i_c = 0$ ), la composante homopolaire d'indice « o » est nulle après transformation de Park.

Les repères (dq) de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations, ceci se fait en liant les angles par la relation (II.11):

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II.11})$$

Ce qui permet d'écrire la relation suivant :

$$\omega = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.12})$$

### II.3.4 Application de la transformation de Park au modèle de la MAS

On désire transformer les enroulements de la M.AS triphasée en des enroulements biphasé orthogonaux équivalents selon les axes (d- q) lié au champ tournant, voir figure (2.3), ainsi la composante homopolaire pour équilibrer le système transformé, c'est à dire :

- Direct selon l'axe (d).
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire (o).

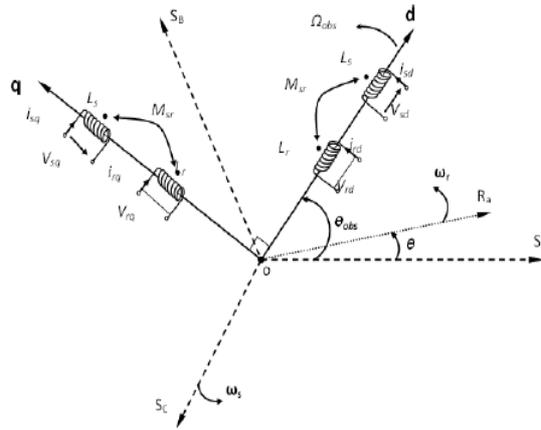


Figure 2.3 : Référentiel tournant d'axes (d– q).

Où :  $\theta_{obs} = \int \omega_{obs} dt$  est une position quelconque d'observation entre les systèmes d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

Pour le passage du système triphasé vers le système biphasé, on a les équivalents suivants :

- L'équivalent de tension :  $[V_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][V_{abc}]$
- L'équivalent de courant :  $[i_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][i_{abc}]$
- L'équivalent du flux :  $[\Phi_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][\Phi_{abc}]$

(II.13)

Où :  $[P(\theta_{obs})]$  est la matrice de Park.

Dans le cas d'un passage inverse, on a :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[V_{dqo}] \\ [i_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[i_{dqo}] \\ [\Phi_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[\Phi_{dqo}] \end{cases} \quad (II.14)$$

La matrice de transformation de Park modifiée directe et inverse s'écrit alors :

$$[P(\theta_{obs})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & \cos\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_{obs}) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

Le facteur  $\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right)$  est là pour conserver la puissance électrique instantanée

$$[P(\theta_{obs})]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

L'application de la transformation de Park aux modèles matriciels électriques, (2.1) et (2.2), et magnétiques, (2.3), (2.4), permet d'obtenir les équations suivantes :

➤ **Equations électriques**

$$[V_{sd}] = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (II.17)$$

➤ **Equations magnétiques**

$$\Phi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (II.18)$$

$L_{s,r} = L_{s,r} - L_m$  : Inductance cyclique propre du stator et du rotor respectivement.

$L_m = \frac{3}{2} M_0$  : Inductance cyclique mutuelle stator-rotor.

➤ **Equations mécaniques**

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (II.18)$$

### II.3.5 Equations d'état de la MAS

Plusieurs solutions pour orienter le repère « dq » par rapport aux repères triphasés sont possibles. Dans notre cas, on se fixe les axes d et q solidaires du champ tournant de la machine. En régime permanent, cette solution fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales [35].

Dans cette configuration, en régime sinusoïdal permanent, on a :

$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$  : La vitesse angulaire des axes d,q est égale à la pulsation statorique ;

$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$  : La vitesse angulaire des axes d,q est égale à la pulsation rotorique ;

Ces deux pulsation sont reliées à la vitesse mécanique du rotor ( $\Omega$ ) par l'équation suivant :

$$\omega_s - \omega_r = p \quad (II.19)$$

Ainsi, en partant des équations (II.1), (II.2), (II.3), (II.4), et en utilisant la relation (II.16) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère d,q :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

Cette relation représente les équations de la machine asynchrone, dans le repère de PARK solidaire du champ tournant, en régime permanent sinusoïdal.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de PARK est donnée par:

$$C_{em} = P \cdot M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (II.21)$$

L'équation mécanique de la machine asynchrone est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (II.22)$$

Avec :

J : moment d inertie de la machine [Kgm<sup>2</sup>].

f: coefficient de frottement. [N.m /rad. s<sup>-1</sup>].

C<sub>r</sub>: Couple résistant impose a l arbre de la machine [N.m].

C<sub>e</sub>: Couple électromagnétique développe par la machine [N.m].

p : nombre de pairs de pôles.

Ω : vitesse mécanique donnée par :  $\Omega = \frac{\omega}{p}$

#### II.4 Modélisation dynamique du véhicule

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui prend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Ainsi, cette section a pour objectif ; la modélisation de la dynamique du véhicule. Ce

dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques comme les éventuels glissements sur la chaussée, les fluctuations d'adhérence sur la route, le comportement des pneus ou encore l'inertie inhérente à tout système mécanique. Tous ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender [15].

La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante, doit prendre ces non-linéarités en considération. Dans un premier temps, nous décrivons les différentes contraintes dynamiques sur le véhicule qui déterminent les limites à ne pas dépasser. Ces contraintes ont donc une influence sur les trajectoires autorisées pour le véhicule [15].

### II.4.1 Contraintes dynamiques sur le véhicule.

Il faut bien étudier les contraintes dynamiques, car le véhicule étant un système mécanique réel, il est évident qu'il existe des limites sur les forces ou les couples qui peuvent être générés. Des critères prennent en compte la vitesse et l'accélération maximale pour éviter les problèmes de dérapage et de patinage.

- **Contraintes d'accélération 'accélération et freinage'**

Les contraintes d'accélération sont simples mais néanmoins importantes. Il est clair que le moteur a une borne maximale sur l'accélération  $\gamma$  qu'il peut fournir. Cela se traduit par:

$$\gamma = \gamma_{\max} \quad (\text{II. 23})$$

De même, le freinage du véhicule est contrôlé par une force de freinage qui est proportionnelle à la décélération des roues. Cette nouvelle contrainte impose :

- **Contrainte de vitesse maximale**

Il semble naturel que le véhicule aura une vitesse maximale. Alors la cinématique du véhicule peut être exprimée avec les contraintes additionnelles suivantes :

$$\begin{aligned} 0 &\leq V_x \leq V_{x\max} \\ -\omega_{\max} &\leq \omega \leq \omega_{\max} \end{aligned} \quad (\text{II. 24})$$

- **Contrainte de non-glissement**

---

La contrainte de non-glissement réduit encore l'ensemble des accélérations admissibles. Il est nécessaire de prendre en compte les glissements en faisant référence au coefficient de glissement  $\mu$  qui définit dans quelles circonstances un glissement aura lieu connaissant la force normale à la surface de contact. Si  $F$  tangentielle  $\geq \mu F$  normale alors il y aura glissement [2]. Donc, on peut exprimer la relation précédente comme suit :

$$M\gamma \geq \mu \cdot M \cdot g \quad (\text{II. 25})$$

Ce qui implique :

$$\sqrt{V_x^2 + V_y^2} \geq \mu \cdot g \quad (\text{II. 26})$$

Où :

$M$  : Masse du véhicule ;

$\gamma$  : Accélération tangentielle du véhicule ;

$g$  : Accélération de pesanteur.

Donc la contrainte de non-glissement se traduit par :

$$V_x^2 + V_y^2 \leq \mu^2 \cdot g^2 \quad (\text{II. 27})$$

Quand cette expression n'est pas vérifiée, il s'ensuit que le véhicule ne peut suivre sa trajectoire. Cette contrainte de non-glissement est une forme extrêmement simplifiée. Cependant, les modèles d'adhérence aujourd'hui disponibles sont souvent compliqués et font appel à de nombreuses données empiriques. Pour donner une idée de la complexité du phénomène d'adhérence, on notera que la force d'adhérence est fonction de nombreux paramètres pas toujours bien maîtrisés, [20]:

$F$  adhérences =  $f$  (Poids, Pression des pneus, Température, Etat de revêtement de la route)

- **Force d'entraînement :**

Quand le véhicule se déplace, les couples des moteurs appliqués aux roues motrices produisent une force  $F$  qui est parallèle à l'axe  $X_v$ . Cette force est contrainte par l'expression :

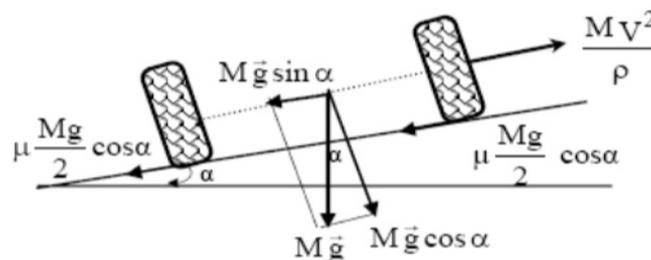
$$0 \leq F \leq F_{\max} \quad (\text{II. 28})$$

### II.4.2 Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale

Lorsqu'un véhicule se déplace dans un virage, la force centrifuge le pousse hors de la courbe avec une valeur dépendante de la vitesse et du rayon de courbure. Pour cette force, il n'y a pas besoin d'un point d'appui matériel, elle est produite par l'inertie du corps. Par contre, afin d'effectuer le virage, l'accélération normale produite par l'angle de rotation pousse le véhicule dans le sens contraire.

Les roues posées sur le sol doivent produire la force centripète qui ramène le véhicule dans la courbe. Ces deux forces en équilibre vont se traduire par un déplacement correct, sinon le déséquilibre produira la dérive du véhicule. Cette dérive a lieu à cause d'une adhésion des roues au sol qui ne correspond pas à la vitesse de déplacement. Lors d'un démarrage, les roues motrices imposent une force de traction au véhicule qui va engendrer le mouvement, si cette force est très importante, les roues patinent [15].

Décomposons le poids du véhicule en une composante dirigée vers le centre de la trajectoire du véhicule, et une composante oblique, dirigée vers le sol, (figure 2.3), Soit  $\alpha$  l'inclinaison de la composante oblique sur la verticale [21].



**Figure 2.4 :** Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle  $\alpha$ .

La condition de non dérapage se traduit par :

$$\frac{M \cdot V^2}{\rho} \leq (M \cdot g \cdot \sin \alpha + \mu \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha) \quad (\text{II. 29})$$

Où :

$\rho$  : Rayon du virage.

V : Vitesse du véhicule.

$\mu$  : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route.

Par suite, la valeur maximale  $V_{\max}$  de la vitesse avec laquelle le véhicule peut aborder le virage sans risque de dérapage vaut:

$$V_{\max} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot \rho} \quad (\text{II. 30})$$

Pour diminuer le risque de dérapage, nous pouvons :

- Diminuer la vitesse du véhicule V.
- Augmenter le rayon de courbure  $\rho$  de la trajectoire.
- Augmenter le Coefficient de friction des pneus du véhicule.

Pour virer, le véhicule doit donc incliner son plan vers la concavité du virage. L'inclinaison dépend de la vitesse et du rayon de la trajectoire ; plus le véhicule va vite et vire court, plus il doit s'incliner. La vitesse maximale est donc contrainte par les mouvements en rotation [22].

### II.4.3 Couples résistant au déplacement

Le couple résistant à la roue ( $C_r$  roue) lié à l'effort résistant total ( $F_{rt}$ ) que doit vaincre le système de motorisation est donné par la relation:

$$C_{r \text{ roue}} = F_{rt} \cdot r = [R_r + R_a + R_p] \cdot r \quad (\text{II. 31})$$

Où :

$R_r$ : Résistance au roulement.

$R_a$  : Résistance aérodynamique.

$R_p$ : Résistance due à la pente.

---

$r$  : rayon d'une roue.

Nous raisonnerons sur un véhicule de masse  $M$ , à deux roues motrices de rayon extérieur  $r$  situées à l'avant, son accélération est  $\gamma$ , sa vitesse  $V$ . Tous les couples résistants seront exprimés en fonction du facteur  $Mgr/2$  caractéristique du véhicule.

### II-4-4 Roulement uniforme sur sol plat

Les efforts résistants sont alors:

- La résistance au roulement qui fait intervenir les pertes d'énergie se produisant dans la surface de contact entre la roue et la surface de roulement.
- La résistance aérodynamique.

- **Résistance au roulement  $R_r$ .**

L'expérience montre que la force qu'il faut appliquer à une roue pour la faire avancer en tournant est égale au produit du poids  $Mg$  par le coefficient de frottement de roulement  $f_r$  [22].

$$R_r = f_r . M.g$$

$g$ : accélération due à la gravité (9.81m/s<sup>2</sup>).

$M$ : masse totale du véhicule (kg)

$f_r$ : coefficient caractérisant la résistance au roulement dépend de la nature et de l'état du bandage de la roue, du sol et de la vitesse de déplacement

Nous donnons ci-dessous quelques valeurs indicatives de  $f_r$  en fonction de l'état du terrain:

- Pneumatique sur bon terrain :  $f_r = 0.015$  à  $0.03$
- Pneumatique sur mauvais terrain :  $f_r = 0.15$
- Pneumatique en tout terrain :  $f_r = 0.2$  à  $0.3$

• **Résistance aérodynamique Ra**

L'expression de la résistance aérodynamique est la suivante [15] :

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot S \cdot c_x \cdot (V \pm V_v)^2 \quad (\text{II. 32})$$

Où :

$\rho_a$ : désigne la masse volumique de l'air ( $\rho=1.293 \text{ kg/_ m}^3$ );

S : est la surface frontale du véhicule en [m<sup>2</sup>];

$C_x$  : est le coefficient de pénétration dans l'air (mesuré expérimentalement);

V : est la vitesse du véhicule en [m/s] ;

$V_v$  : est la vitesse du vent en [m/s].

En l'absence de vent, on peut considérer cette force comme proportionnelle au carré de la vitesse du véhicule. La résistance aérodynamique n'intervient réellement qu'à partir de 60Km/h, mais devient rapidement prépondérante ensuite.

Le couple maximum de roulement à plat (hors pertes dans la transmission) sera donc, pour une roue [23]:

Croulement = 0.08 Mgr/2 véhicule avec pneumatiques.

Croulement = 0.01 Mgr/2 véhicule avec bandage plein.

**II-4-5 Franchissement de pente**

Appliquer le théorème de la résultante dynamique (figure 2.4), dans l'hypothèse d'un mouvement uniforme, conduit à l'équation suivante :

$$R_p = M \cdot g \sin \varphi \quad (\text{II. 33})$$

Le couple nécessaire au franchissement vaut pour une roue :

$$C_p = R_p \cdot r = \frac{1}{2} \cdot M \cdot g \cdot r \sin \varphi \quad (\text{II. 34})$$

Où :

$M$  : masse du véhicule en [Kg].

$g$  : l'accélération de pesanteur.

$r$  : rayon d'une roue.

$\varphi$  : Angle de la pente.

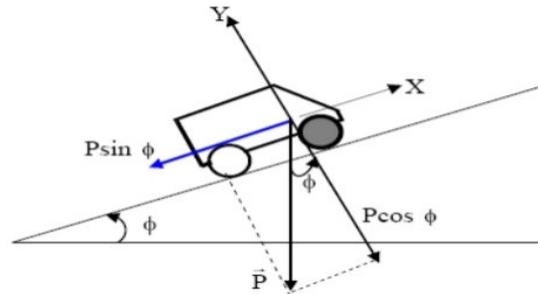


Figure 2.5 : Franchissement de pente.

#### II.4.6 Franchissement d'obstacles

Le véhicule doit, en principe, pouvoir franchir des obstacles jusqu'à une hauteur  $h$  égale au demi rayon de roue  $r/2$  (figure 2.5).

Le couple nécessaire au franchissement est:

$$Cf = \frac{1}{2} \cdot \sin \varphi \cdot M \cdot g \cdot r \text{ avec } \varphi_{\max} = 60^{\circ} \quad (\text{II. 35})$$

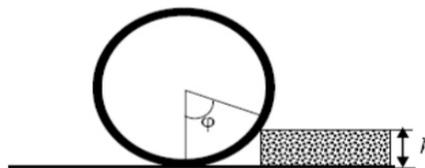


Figure 2.6 : Franchissement d'obstacles.

Notons que ce couple estimé est surdimensionné ; en effet [24]

- Un obstacle n'est jamais attaqué à vitesse nulle.
- L'adhérence naturelle de la bande de roulement et/ou l'écrasement du pneumatique facilitent le franchissement.

Le rayon de la roue doit être le plus grand possible, pour faciliter le franchissement des obstacles.

**II.4.7 Accélération**

La résistance inertielle totale vaut :

$$R_i = M \cdot \gamma + \sum J \tag{II. 36}$$

Au maximum, le deuxième terme est couramment estimé à 15% du premier. Le couple nécessaire à l'accélération du véhicule est donc, pour une roue [24]:

$$C_{acc} = 1.15 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot M \cdot g \cdot \frac{r}{2} \tag{II. 37}$$

Notons que  $(\gamma/g)$  caractérise la performance du véhicule en accélération.

**II.4.8 Résistance au glissement (adhérence)**

Pour qu'une roue tourne effectivement, il faut qu'elle adhère au sol. L'expérience montre que pour déplacer un corps sur une surface, il faut lui appliquer une force égale au produit de son poids par un coefficient de frottement de glissement.

$$R_g = \mu \cdot M \cdot g \tag{II. 45}$$

Le coefficient  $\mu$  dépend également de la nature des surfaces en contact [15], Tableau (2.1).

Pneu neuf sur	$\mu$
Béton ordinaire (sec)	0.7
Macadam propre et sec	0.6
Asphalte sec	0.5 à 0.75
Asphalte mouillé	0.25 à 0.4
Goudron humide	0.2 à 0.3
Terrain meuble	0.1 à 0.2
Béton rugueux	0.9 à 1

**Tableau 2.1 :** Quelques valeurs de coefficient de friction  $\mu$ .

On voit donc qu'en général  $R_r$  est beaucoup inférieure à  $R_g$ , il en résulte que si on applique une force suffisante aux roues d'un véhicule il avance, la roue tournant sans glisser.

### II.5 Transmission et réducteur mécanique

Le réducteur est un élément très important permettant souvent une économie conséquente sur la masse du moteur dont les dimensions ont déterminées principalement par le couple à fournir. Le réducteur est modélisé par un gain  $k$  en supposant qu'il n'y a pas de pertes mécanique [25].

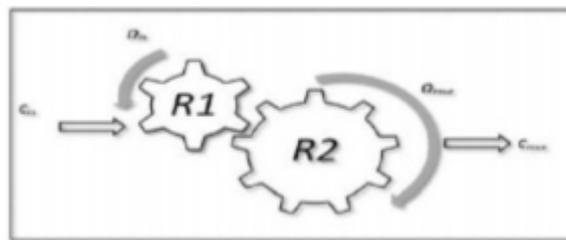


Figure 2.7 : Transmission de couple moteur à la roue

### II.6 Conclusion

Dans cette partie de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'élaboration d'un modèle dynamique du VE, incluant les différents éléments mécaniques et électriques et un aperçu sur leur actualité récente, ainsi les éléments constitue une chaîne de traction ainsi les différents configurations et/ou architectures existant. Par la suite nous avons abordé une modélisation dynamique du véhicule électrique avec études de quelques situations affronte le mouvement du véhicule tel que franchissement d'une pente, d'obstacle, accélération, ... etc.

# **Chapitre III**

## *Simulation du véhicule électrique*

### III.1 Introduction

La modélisation et la simulation sont devenues un passage obligé pour comprendre, apercevoir, commander ou surveiller un processus quelconque [29].

Le travail dont fait l'objet ce chapitre est destinée à la simulation de la machine asynchrone à cage d'écuréuil, Et la commande vectorielle que ce soit sur la MAS, L'association convertisseur-machine et aussi sur le VE.

### III.2 Simulation de la machine asynchrone

Par les équations de modélisation de la machine asynchrone qu'on fait dans le chapitre II on obtient l'équation matricielle suivante qui en globe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère d,q :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (III.1)$$

Cette relation représente les équations de la machine asynchrone, dans le repère de PARK solidaire du champ tournant, en régime permanent sinusoïdal.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de PARK est donnée par:

$$C_{em} = P \cdot M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (III.2)$$

L'équation mécanique de la machine asynchrone est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (III.3)$$

Avec :

J : moment d inertie de la machine [Kgm<sup>2</sup>]

f: coefficient de frottement. [N.m /rad].

Cr: Couple résistant impose a l arbre de la machine [N.m].

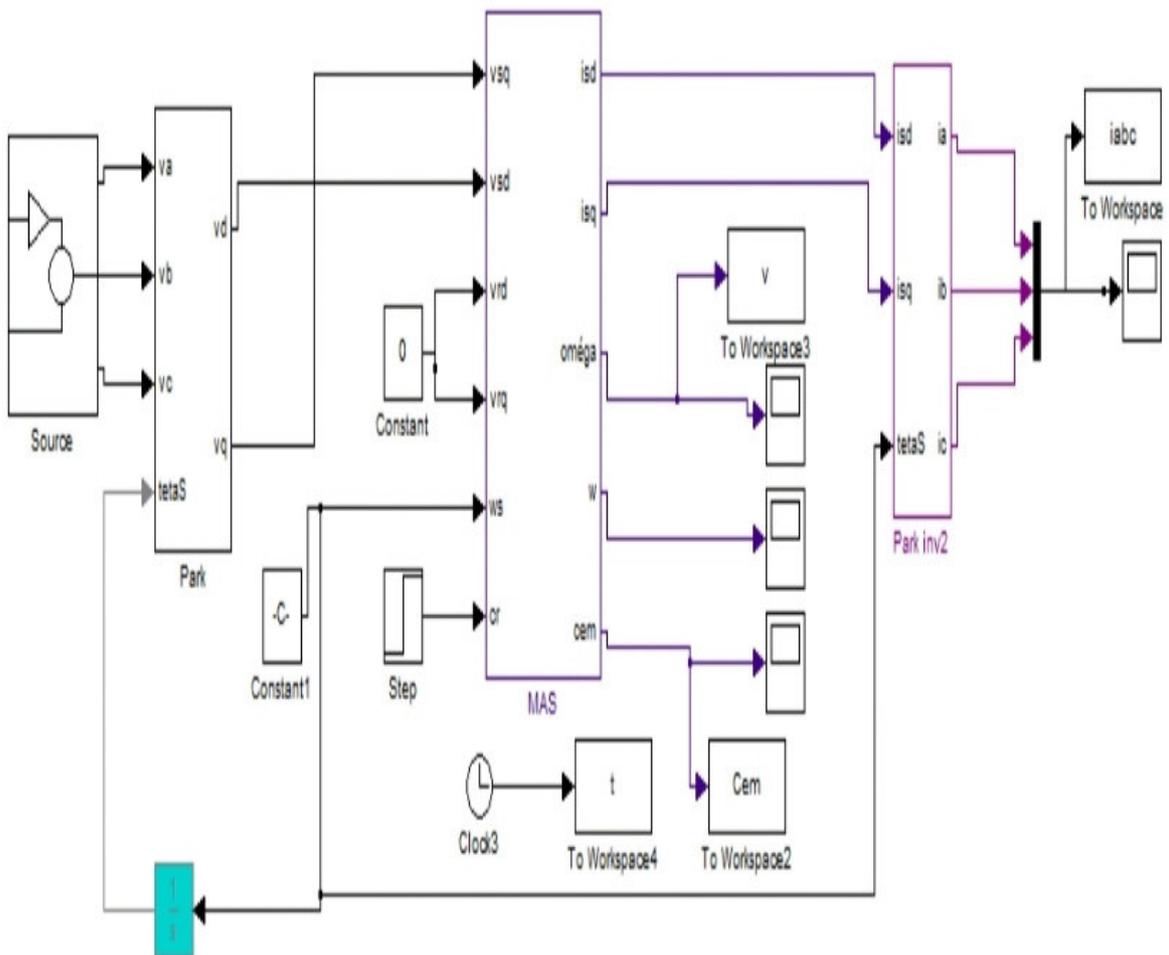
Ce: Couple électromagnétique développe par la machine [N.m].

p : nombre de paires de pôles.

Ω : vitesse mécanique donnée par : Ω=w/p

### III.2.1 Le schéma bloc de la machine asynchrone

La structure en schéma bloc de cette simulation est présentée par la figure suivante



**Figure 3.1 :** Schéma bloc de simulation de la machine asynchrone.

### III.2.2 Les résultats de simulation

Nous procédons à la simulation du démarrage de la MAS alimentée par un système des tensions sinusoïdales .Le démarrage se fait à vide puis une application d'un couple résistant ( $C_r=20 \text{ Nm}$ ) a l'instant  $t=2s$ .

On a simulé le model de la machine asynchrone et on a obtenu les résultats suivant :

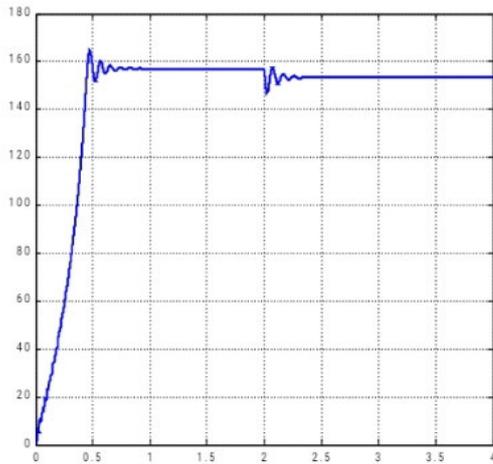


Figure 3.2: vitesse de rotation

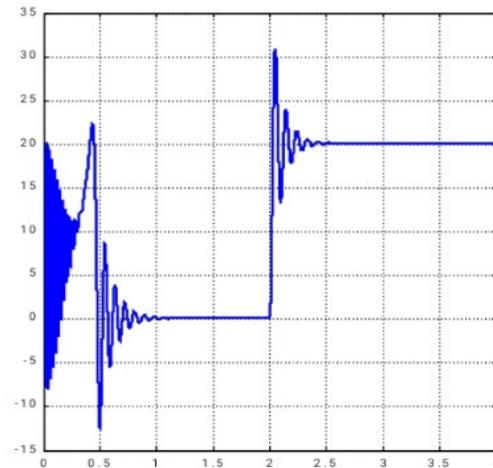


Figure 3.3: Couple électromagnétique

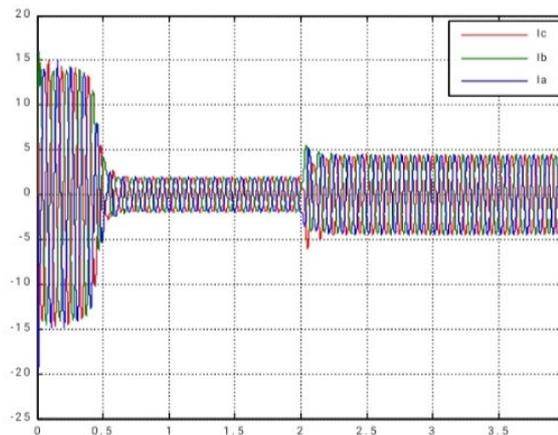


Figure 3.4: Courant statorique (Iabc).

### III.2.3 Interprétation des résultats

Lors de démarrage, on constate des pics de courants importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire.

L'allure de la vitesse présente des oscillations dans les premiers instants de démarrage avec un accroissement presque linéaire, ensuite la vitesse se stabilise à la valeur nominale 157 [rad/s]. En appliquant une charge à l'instant  $t=2s$ , on constate une légère diminution de vitesse. Ainsi l'évolution du couple électromagnétique en

fonction du temps. Au premier instant du démarrage, le couple électromagnétique est fortement perturbé à cause du moment d'inertie, il atteint la valeur (20 N.m).

L'application de la charge qui se traduit par l'apparition d'une valeur qui correspond au couple appliqué.

Le courant statorique en fonction du temps, répond au classique appel du courant en démarrage qui égale à 9 fois environ le courant nominal. Au démarrage le courant statorique est très important, vu qu'il est de courte durée, la machine pourrait le supporter sans risquer un échauffement dangereux. Cette valeur de courant due au régime transitoire disparaît au bout de quelques alternances afin d'obtenir une forme sinusoïdale d'amplitude constante. A l'instant  $t=2s$ , on constate que le courant statorique augmente à cause de l'augmentation du couple résistant (charge).

### III.3 Commandes de la machine à induction

#### III.3.1 Commande scalaire

La commande scalaire, permet de contrôler le couple en régime permanent avec le maintien du flux dans la machine à une valeur fixe. Ce type de contrôle convient surtout à des performances moyennes de fonctionnement de la machine asynchrone.

Cette commande est ce, nonobstant ses inconvénients vis-à-vis ses performances, beaucoup utilisée dans l'industrie car elle est favorisée par sa simplicité et son coût plutôt bon marché.

#### III.3.2 Commande vectorielle

C'est pour supplanter les limitations de la commande scalaire que la commande vectorielle de la MI a été introduite dans le milieu industriel pour subvenir aux applications de moyenne et hautes performances dynamiques et statiques. L'avènement des microprocesseurs à partir des années 1970, et leur importante évolution dans les années 1980, a permis sa concrétisation expérimentale. Cette commande est élaborée sur la base du modèle de la MI projeté dans le repère du flux. Les composantes directe et en quadrature du courant statorique obtenus peuvent donner une commande découplée du flux et du couple, respectivement. Des fonctionnements comparables à ceux d'une machine à courant continu à excitation séparée sont alors réalisés. Selon la détermination de la position du flux, on peut distinguer deux types

de commandes vectorielles, dites directes et indirectes. De nombreuses variantes ont été développées, elles sont liées aux degrés de liberté offerts par le modèle de la MI, et donc selon le référentiel de travail, à la nature du flux à orienter et à réguler (statorique, rotorique ou de l'entrefer), et enfin à la procédure d'obtention du flux directe ou indirecte. [30]

### III.3.3 Commande directe du couple (DTC)

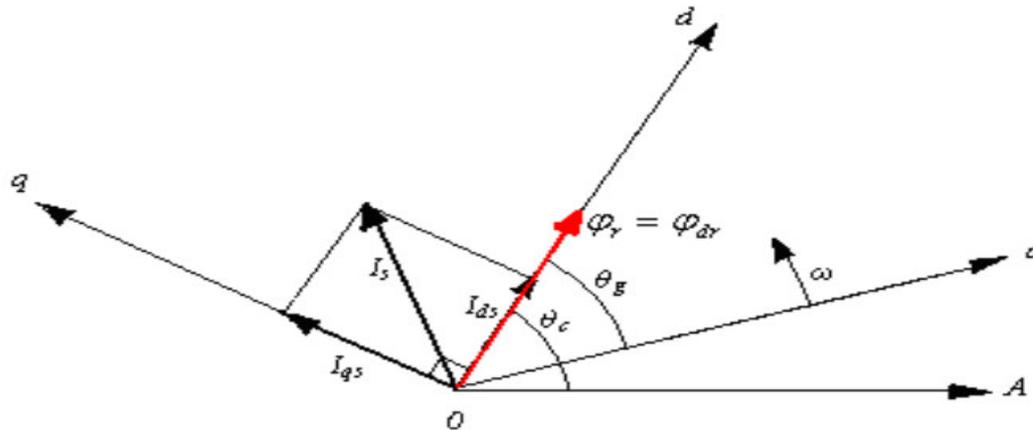
La commande dite DTC, ou Commande Directe du Couple, est apparue pour concurrencer les commandes précédentes en matière de la maîtrise du contrôle du couple. Elle a été largement développée par M. DEPENBROCK en Allemagne et par I. TAKAHASHI, et T. NOGUCHI au Japon. La DTC n'est pas basée sur l'imitation de la commande d'une machine à courant continu, comme le cas de la commande vectorielle, mais cible une exploitation plus directe et complète du couple et du flux de la machine. Ceci permet de s'affranchir des transformations non linéaires des coordonnées, ce qui simplifiera la mise en œuvre de son algorithme de commande. La technique DTC utilise une alimentation par modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui consiste à chercher, à tout instant, la combinaison optimale des interrupteurs de l'onduleur de tension. Ses avantages, par rapport aux techniques conventionnelles, sont dans l'amélioration du temps de réponse en couple, de la robustesse vis-à-vis de la variation paramétriques, avec la possibilité de fonctionnement sans capteur mécanique (capteur de vitesse, position). Néanmoins, l'inconvénient principal de la DTC est la difficulté de fonctionnement à très faibles vitesses due aux ondulations élevées des courants et du couple, ce qui nécessitera l'apport des méthodes d'appoint particulières. [30]

### III.3.4 Commande par mode glissant

La technique de commande par modes de glissement consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers une surface de glissement et de la faire commuter autour de celle-ci à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre. D'où le phénomène de glissement. Ce dernier rend le système bouclé insensible à la variation paramétrique et aux perturbations extérieures. Une propriété importante des régimes glissants est que la trajectoire d'état en mode glissant évolue dans un espace de dimension inférieure à celle du système à contrôler. [30]

### III.4 Principe de la commande vectorielle à flux orienté

Le principe de la commande par flux orienté consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (MCC) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit de placer le référentiel (d,q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante. [32]

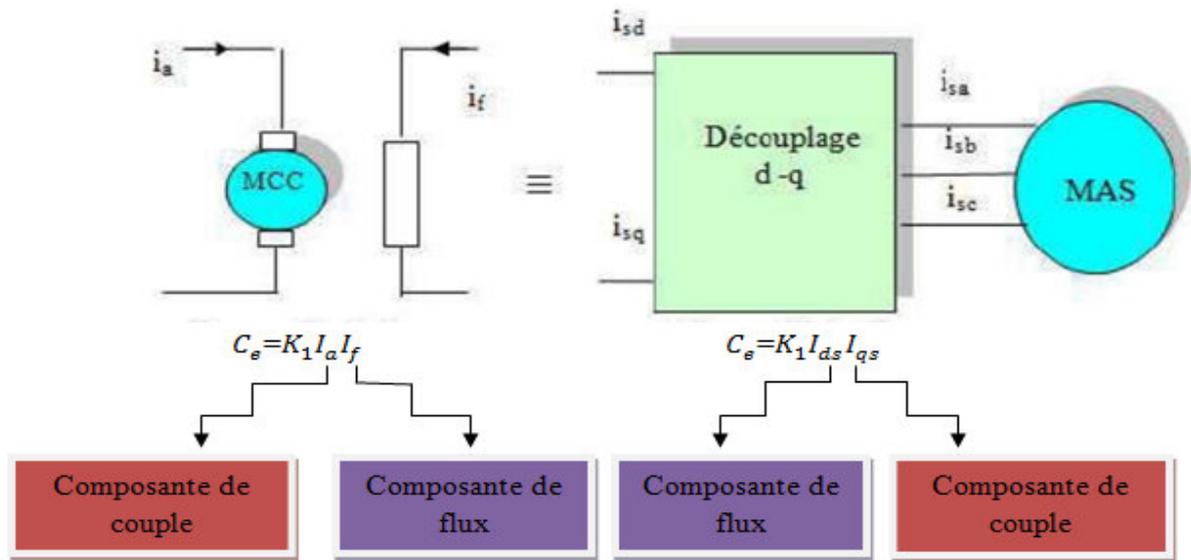


**Figure 3.5:** Principe de commande par orientation du flux.

Trois choix sont possibles pour fixer l'orientation du flux représenté dans la figure (3-1), soit

- Orienter le flux rotorique avec la condition :  $\varphi_{dr} = \varphi_r$  et  $\varphi_{qr} = 0$
- Orienter le flux statorique avec la condition :  $\varphi_{ds} = \varphi_s$  et  $\varphi_{qs} = 0$
- Orienter le flux d'entrefer avec la condition :  $\varphi_{de} = \varphi_e$  et  $\varphi_{qe} = 0$

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée car elle permet d'obtenir un couple de démarrage important, ainsi elle élimine l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique et donnent de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer. [33]



**Figure 3.6:** Analogie de la MAS avec la MCC dans la commande vectorielle.

### III.5 Types de la commande vectorielle

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes, la première appelée méthode directe qui à été développé par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par k.Hasse[27].

#### III.5.1 Commande vectorielle directe

Connue sous le nom de contrôle direct du flux ((DFOC) Direct Field Oriented Control), cette méthode exige une bonne connaissance du module et de la phase du flux rotorique quelque soit le régime transitoire effectué.

Une première méthode consiste à mesurer directement le flux de la machine à l'aide de capteurs positionnés dans l'entrefer et d'en déduire l'amplitude et la phase. Le calcul du flux se base sur l'intégration des courants statoriques mesurés. En outre, la connaissance de la position du flux dans les référentiels tournant (d.q) est également nécessaire à l'élaboration des modèles du flux, du couple et des courants de référence du système de commande .Cette mesure permet de concevoir une commande vectorielle complètement découplée (flux et couple) par contre l'installation de capteurs de flux augmente le coût de fabrication. Pour cette raison, une deuxième méthode basée sur l'estimation (boucle ouverte) ou observation (boucle fermée) du flux à partir de mesures effectuées sur le montage (courants, tensions, vitesse) est généralement utilisée [26].

### III.5.2 Commande Vectorielle Indirect

Contrairement à la commande vectorielle directe, la méthode indirecte consiste à ne pas estimer l'amplitude du flux rotorique mais à utiliser directement l'amplitude de référence. L'intérêt de cette méthode est d'utiliser uniquement des grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées. En effet, à partir d'un couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$  et du flux rotorique de référence, la méthode de commande indirecte se caractérise donc par le fait qu'aucune estimation du flux n'est nécessaire [34].

### III.6 Choix du référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes (d,q) qui dépendent des objectifs de l'application :

- axes tournant à la vitesse du rotor ( $\omega_{obs} = \omega_r$ ).
- axes liés au stator ( $\omega_{obs} = 0$ ).
- axes solidaires du champ tournant ( $\omega_{obs} = \omega_s$ ) [28].

### III.7 Principe de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe «d» d'une référence solide au champ tournant de vitesse ( $\omega_s$ ), donc on peut remarquer les propriétés suivantes:

- La composante transversale du flux rotorique est nulle.  $\varphi_{rq} = 0$
- L'axe «d» est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique.  $\overline{\varphi_r} = \varphi_{rd}$
- La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant ( $\varphi_{rd} = cst \Rightarrow I_{rd} = 0$ ) [27].

Le modèle vectoriel de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Les équations de Park. (3.3), munies de la contrainte  $\varphi_{qr} = 0$ , débouchent donc sur les propriétés enchaînées de la manière suivante :

- l'axe d est aligné systématiquement sur le vecteur flux rotorique tel que  $\varphi_{dr} = \varphi_r$
- la composante  $I_{dr}$  du courant rotorique est toujours nulle si le flux rotorique est maintenu constant.

En effet, on a :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r = cst \text{ et } \varphi_{qr} = 0 \\ V_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \end{cases} \quad R_r I_{dr} = 0 \quad I_{dr} = 0$$

L'évolution du couple suit celle de  $i_{qr}$  qui peut alors être contrôlé par  $I_{qs}$ . En effet, on a :

$$\varphi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr} = 0 I_{qr} = -\frac{M I_{qs}}{L_r}$$

Ceci conduit à l'expression du couple suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \varphi_r I_{qs} \quad (III.5)$$

Les équations des machines dans un référentiel lié au champ tournant, deviennent

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{d\varphi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s \frac{M}{L_r} \varphi_r + \omega_s \sigma L_s I_{ds} \end{cases} \quad (III.6)$$

$$\varphi_r + T_r \frac{d\varphi_r}{dt} = M I_{ds} \quad (III.7)$$

Après passage par une transformation de Laplace nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{ds} = (R_s + P\sigma L_s) I_{ds} - \omega_s \sigma L_s I_{qs} \\ V_{qs} = (R_s + P\sigma L_s) I_{qs} + \omega_s \sigma L_s I_{ds} \end{cases} \quad (III.8)$$

$$\varphi_r = \frac{M}{1+T_r P} I_{ds} \quad (III.9)$$

On a :

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} \varphi_r I_{qs} \quad (III.10)$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (III.11)$$

Les équations (III.6) et (III.7) mettant respectivement en évidence le courant producteur du flux  $I_{ds}$ , et le courant producteur du couple  $I_{qs}$ .

Dans ce type de commande, l'angle  $\theta_s$ , utilisé pour la transformation directe et inverse, est calculé à partir de la formule suivante:

$$\theta_s = \int \left( P\Omega + \frac{I_{qs}^*}{T_r I_{ds}^*} \right) dt \quad (III.12)$$

$$\text{ou } I_{ds}^* = \frac{\varphi_r^*}{M} \quad (\text{III.13})$$

Les principaux constituants dans ce type de commande sont la boucle de régulation de vitesse, celles des courants  $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$ , le bloc de calcul de  $\theta_s$  et les transformations directe et inverse. La vitesse est régulée à travers la boucle externe du bloc. La sortie de son régulateur est le couple électromagnétique de référence  $C_e^*$ . Les composantes  $I_{ds}^*$  et  $I_{qs}^*$  sont calculées.  $I_{qs}^*$  est comparé à la valeur  $I_{qs}$  issue de la mesure des courants réels. L'erreur entre ces valeurs sollicite l'entrée du régulateur dont la sortie est la tension de référence  $V_{qs}^*$ . En parallèle, les sorties des régulateurs  $V_{ds}^*$  et  $V_{qs}^*$  sont alors transformées en grandeurs statoriques à l'aide d'une rotation d'angle  $\theta_s$ . Ce dernier, qui représente l'orientation du repère lié au champ tournant, est donné par  $\theta_s = \int \omega_s dt + \theta_0$ . L'intégration de la pulsation statorique est obtenue par la relation :  $\omega_s = \omega_r + P\Omega$

On peut alors calculer les composantes triphasées des tensions après transformation de Park. Les tensions sont alors reconstituées par un onduleur commandé par une *MLI*.

Les courants  $I_{as}$  et  $I_{bs}$  sont mesurés, puis transformés à l'aide des transformations inverses, ce qui donne  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  qu'on utilise pour la régulation des courants.

### III.8 Découplage

Les équations statoriques comprennent en effet des termes qui font intervenir des courants de l'autre axe. En supposant que le flux rotorique varie très lentement, les équations s'écrivent:

$$\begin{cases} V_{ds} = (R_s + P\sigma L_s)I_{ds} - \omega_s \sigma L_s I_{qs} \\ V_{qs} = (R_s + P\sigma L_s)I_{qs} + \omega_s \sigma L_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

$$\varphi_r = \frac{M}{1 + T_r P} I_{ds}$$

$$\omega_r = \frac{M}{T_r \varphi_r} I_{qs} \quad (\text{III.15})$$

Nous pouvons alors représenter la machine par le schéma suivant [31] :

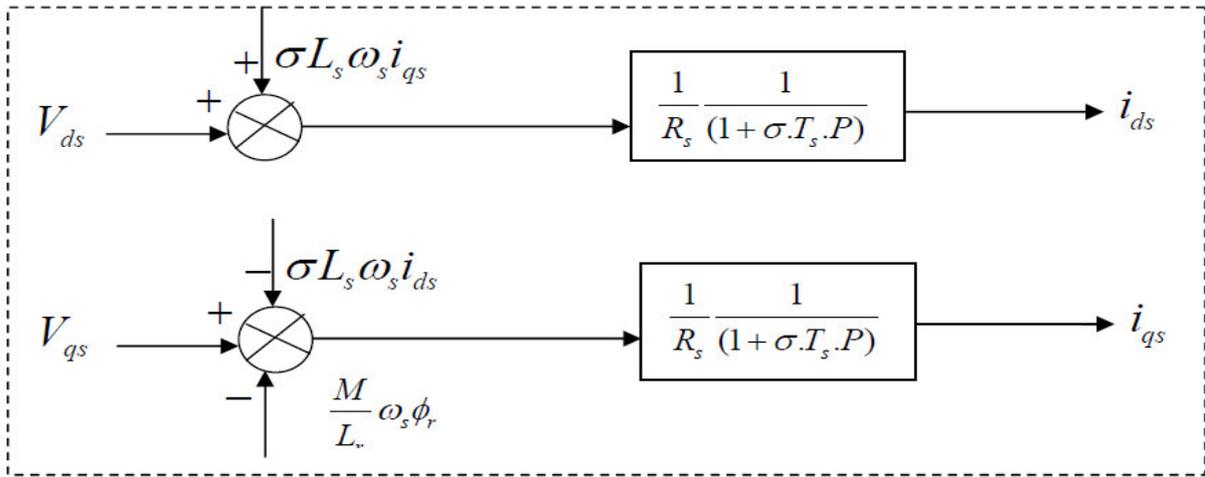


Figure 3.7:Modèle de la machine.

Les termes  $\omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot I_{qs}$ ,  $\omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \phi_r$  et  $\omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot I_{ds}$  Correspondent aux termes de découplage entre les axes d, q.

### III.8.1 Découplage entré-sortie

Les lois de commandes vectorielles des machines asynchrones alimentées en tension présentent des couplages entre les actions sur les axes d et q. Le flux et le couple dépendent simultanément des tensions  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ , donc il faut réaliser un découplage.

L'objectif est, dans la mesure du possible, de limiter l'effet d'une entrée à une seule sortie, nous pourrions alors modéliser le processus sous la forme d'un ensemble de systèmes mono variables évoluant en parallèle, les commandes sont alors non interactives.

Différentes techniques existent: découplage utilisant un régulateur, découplage par retour d'état, découplage par compensation, nous présentons le découplage par compensation [29].

### III.8.2 Découplage par compensation

Définitions de deux nouvelles variables de commande  $V_{ds}^*$ ,  $V_{qs}^*$  telles que :

$$V_{ds} = V_{ds}^* - e_d \tag{III.16}$$

Avec :

$$e_d = \omega_s \sigma L_s I_{qs} \tag{III.17}$$

$$\frac{I_{qs}}{V_{ds}^*} = \frac{1}{R_s + \sigma T_s P}$$

La perturbation de la tension est compensée par un terme identique de manière à ce que la fonction de transfert équivalente soit celle indiquée ci dessus. On peut considérer de manière analogue la deuxième expression et définit :

$$V_{qs} = V_{qs}^* - e_q \tag{III.18}$$

Avec :

$$V_{qs}^* = (R_s + P\sigma L_s)I_{qs} \tag{III.19}$$

$$e_q = -\omega_s \frac{M}{L_s} \varphi_r + \omega_s \sigma L_s I_{qs} \tag{III.20}$$

De la même façon, le terme  $e_q$  est ajouté de manière à obtenir la fonction de transfert suivante:

$$\frac{I_{qs}}{V_{ds}^*} = \frac{1}{R_s + \sigma T_s P} \tag{III.21}$$

Les tensions  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  sont alors reconstituées à partir des tensions  $V_{ds}^*$  et  $V_{qs}^*$  figure (3.8)

Telque:

$$\begin{cases} V_{ds}^* = V_{ds} - e_d \\ V_{qs}^* = V_{qs} - e_q \end{cases} \tag{III.22}$$

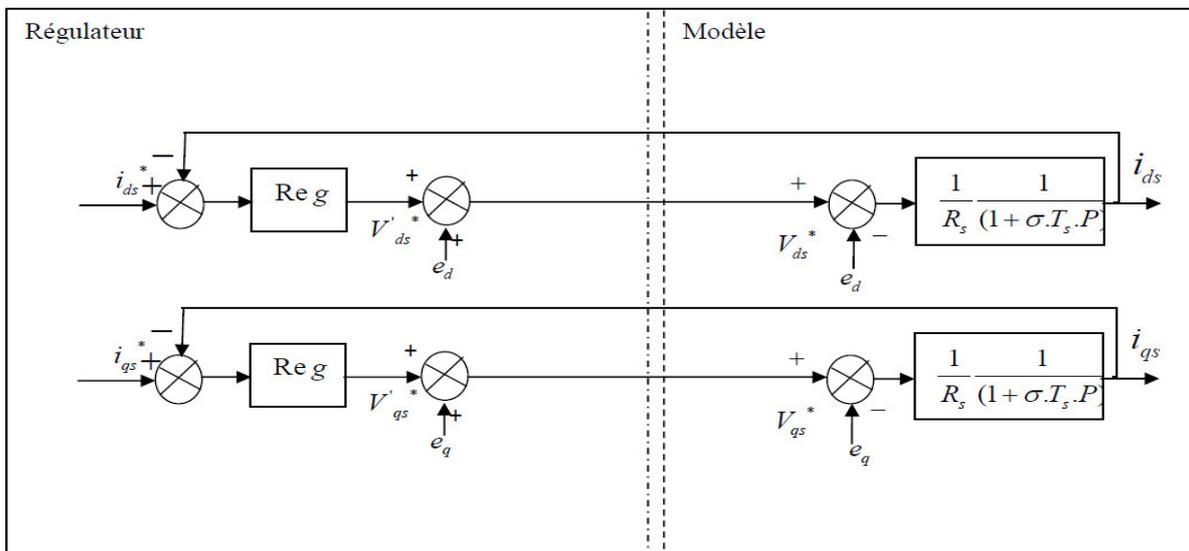


Figure 3.8 : Découplage par addition des termes de compensation.

On obtient alors les schémas bloc simple et identique pour les deux axes [26] :

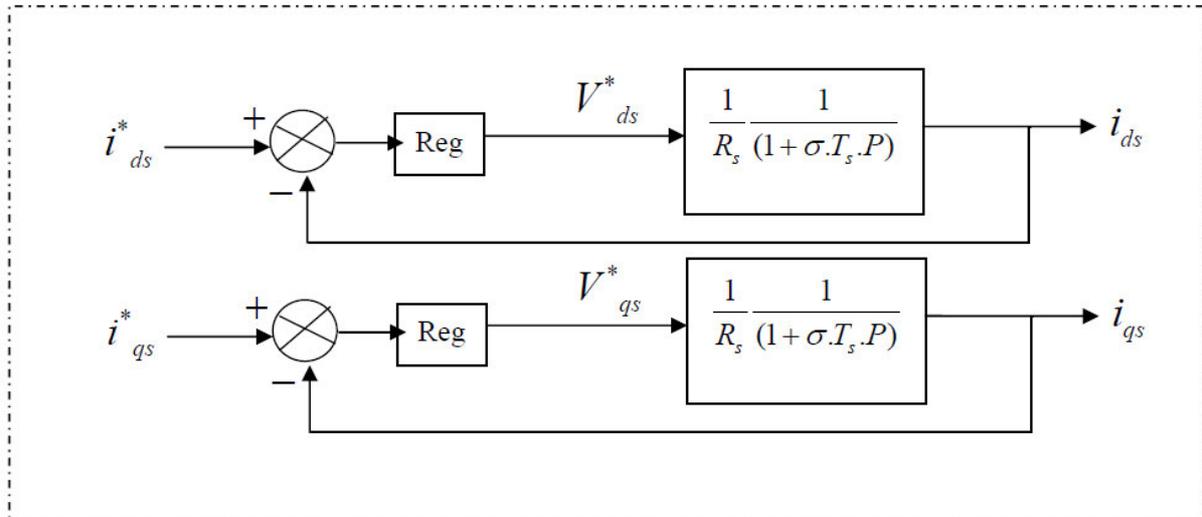


Figure 3.9: Commande découplée.

### III.9 Bloc de défluxage

Le bloc de défluxage permet l'exploitation optimale des capacités magnétique de la machine, permet un fonctionnement à couple constant si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale d'une part ce bloc permet, en outre d'affaiblir le flux inversement proportionnel à la vitesse, pour le fonctionnement à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitessenominale .Il est défini par la fonction non linéaire suivante [34]:

$$\varphi_r = \varphi_{mom} \text{ pour } |\Omega_r| \leq \Omega_{mom} \tag{III.23}$$

$$\varphi_r = \frac{\Omega_{mom}}{|\Omega_r|} \cdot \varphi_{mom} \text{ Pour } |\varphi_r| \geq \varphi_{mom} \tag{III.24}$$

Avec

$\Omega_{mom}$  : Vitesse de rotation nominale.

$\varphi_{mom}$  : Flux rotorique nominale

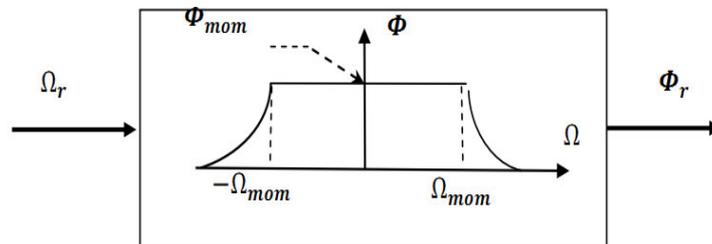


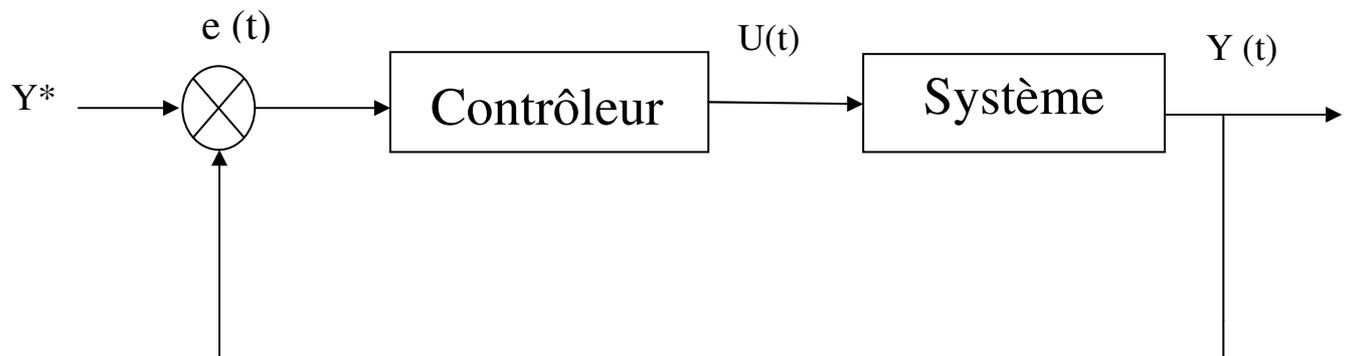
Figure 3.10: Bloc de défluxage.

### III.10 Régulation:

Dans le cas de notre étude on se limite à la technique du contrôle (PI).

### III.10.1 Conception des régulateurs:

Soit  $Y^*(t)$  le signal à pour suivre, et  $y(t)$  le signal de sortie du système à contrôler.



**Figure 3.11:** Représentation de la commande par PI.

La loi de commande est :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) \quad (\text{III. 24})$$

#### III.10.1.1 Action proportionnelle:

- Si  $K_p$  est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît
- Si  $K_p$  est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

#### III.10.1.2 Action intégrale:

L'action intégrale régit, lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste l'action  $u(t)$  augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

### III.10.2 Calcul des régulateurs :

#### III.10.2.1 Régulation de courant

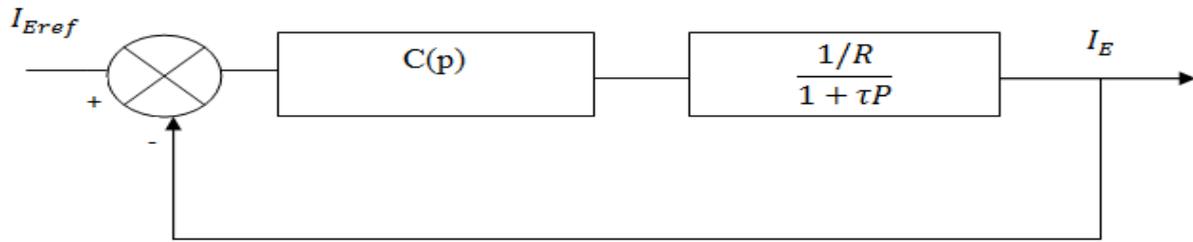


Figure 3.12: Schéma bloc de la régulation du courant.

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \tag{III.25}$$

$k_p$  : est le coefficient de proportionnalité.

$K_i$ : est le coefficient d'intégration.

P: est l'opérateur de Laplace.

$$= K_p \left(1 + \frac{K_i}{K_p P}\right) = K_p \left(\frac{1 + \tau_c P}{\tau_c P}\right)$$

Avec :

$$\tau_c = \frac{K_p}{K_i}$$

- **Calcul de  $K_p$  et  $K_I$**

Fonction de transfert en boucle ouvert

$$T_c(P) = k_p \left(\frac{1 + \tau_c P}{\tau_c P}\right) \left(\frac{\frac{1}{R}}{1 + \tau_c P}\right)$$

Fonction de transfert en boucle fermé

$$F_c(P) = \frac{T_c(P)}{1 + T_c(P)} = \frac{k_p \left(\frac{1 + \tau_c P}{\tau_c P}\right) \left(\frac{\frac{1}{R}}{1 + \tau_c P}\right)}{1 + k_p \left(\frac{1 + \tau_c P}{\tau_c P}\right) \left(\frac{\frac{1}{R}}{1 + \tau_c P}\right)}$$

$$= \frac{\frac{K_p}{R} (1 + \tau_c P)}{\tau_c P (1 + \tau_p) + \frac{K_p}{R} (1 + \tau_c P)}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\frac{K_p}{R}(1+\tau_c P)}{\tau_c \tau P^2 + \left(1 + \frac{K_p}{R}\right) \tau_c P + \frac{K_p}{R}} \\
 &= \frac{1 + \tau_c P}{\frac{R}{K_p} \tau_c \tau P^2 + \frac{R}{K_p} \left(1 + \frac{K_p}{R}\right) \tau_c P + 1} \tag{III. 26}
 \end{aligned}$$

$$\tau_m P^2 + 2\varepsilon \tau_m P + 1$$

Avec

$$\tau_m = \frac{R}{K_p} \tau_c \tau$$

$$2\varepsilon \tau_m = \frac{R}{K_p} \left(1 + \frac{K_p}{R}\right)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

### III.10.2.2 Calcule le régulateur de vitesse

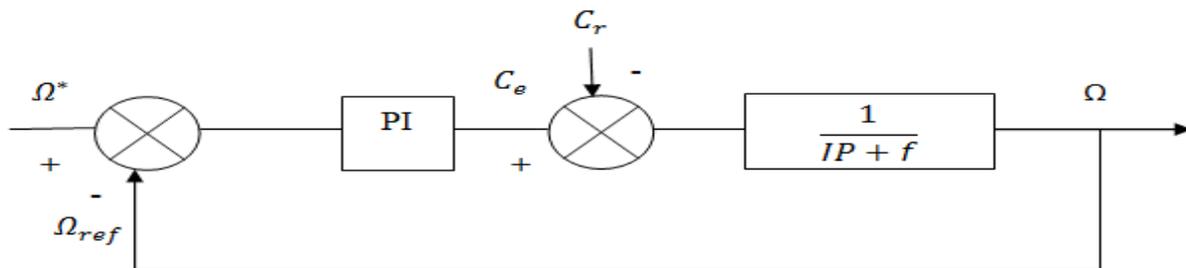


Figure 3.13: Schéma bloc de la régulation de la vitesse.

$$C(P) = K_p + \frac{K_i}{P} = K_p \left(1 + \frac{K_i}{K_p P}\right) \tag{III.27}$$

$$= K_p \left(\frac{1 + \tau P}{\tau P}\right)$$

Avec  $T = \frac{K_p}{K_i}$

- Calcule de  $K_i$  et  $k_p$

Fonction de transfert en boucle ouvert

$$T_c(P) = K_p \left( \frac{1+\tau P}{\tau P} \right) \cdot \frac{1}{JP+f}$$

Fonction de transfert en boucle fermé

$$\begin{aligned} F_c(p) &= \frac{T_c(P)}{1+T_c(P)} \\ &= \frac{K_p \left( \frac{1+\tau P}{\tau P} \right) \cdot \frac{1}{JP+f}}{1+K_p \left( \frac{1+\tau P}{\tau P} \right) \cdot \frac{1}{JP+f}} \\ &= \frac{K_p(1+\tau P)}{\tau P(JP+f)+K_p(1+\tau P)} \\ &= \frac{K_p(1+\tau P)}{J\tau P^2 + \tau f P + K_p \tau P + K_p} \\ &= \frac{1+\tau P}{\frac{J}{K_p} \tau P^2 + \frac{1}{K_p} (1+K_p) \tau P + 1} \end{aligned} \tag{III.28}$$

$$\tau_m^2 P^2 + 2\varepsilon \tau_m P + 1$$

D'où

$$\begin{cases} \tau_m^2 = \frac{J}{K_p} \tau \\ 2\varepsilon \tau_m = \frac{1}{K_p} (f + K_p) \tau \end{cases}$$

Avec

$$\tau = \frac{K_p}{K_i}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

### III.11 Modélisation du L'onduleur MLI

L'onduleur est un convertisseur statique qui assure la transformation d'énergie d'une source continu en énergie alternative, comme le montre le schéma ci-dessous [35] :

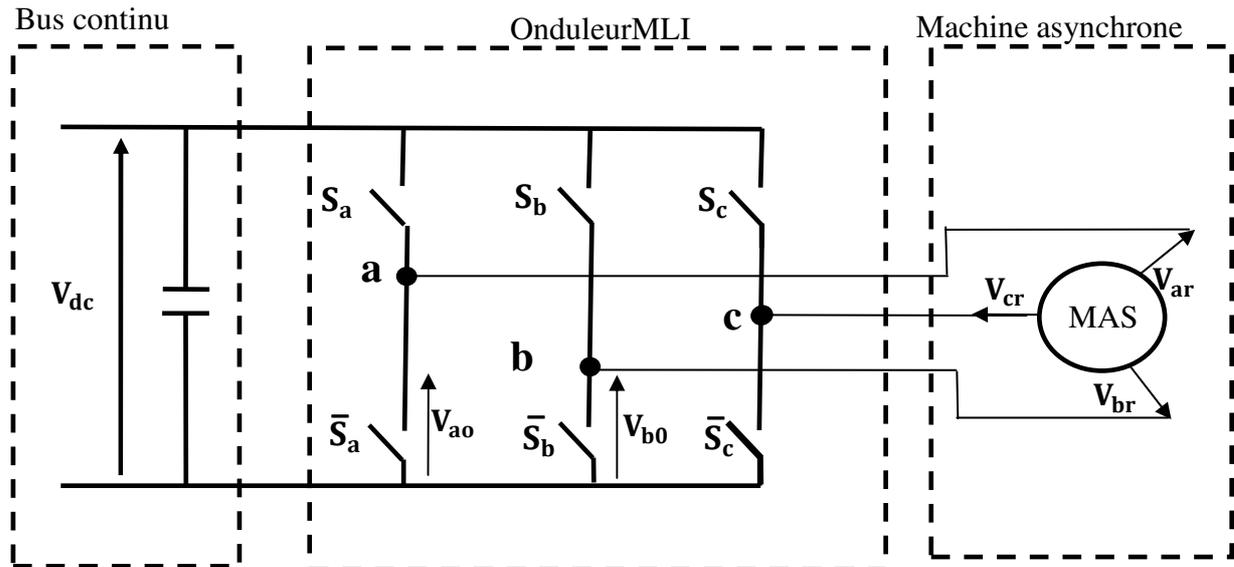


Figure 3.14 : Schéma de l'onduleur MLI.

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.29)$$

$$i_{dc} = S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc} \quad (III.30)$$

Avec :

$V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$ : Tensions de références [V] ;

$V_{dc}$ : Tension de bus continu [V] ;

$I_{dc}$ : Courant moduler par le redresseur [A] ;

$S_a, S_b, S_c$ : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'amorçage

### III.12 Simulation de la commande vectorielle de la MAS

Le schéma global de notre système est donné par la figure suivante :

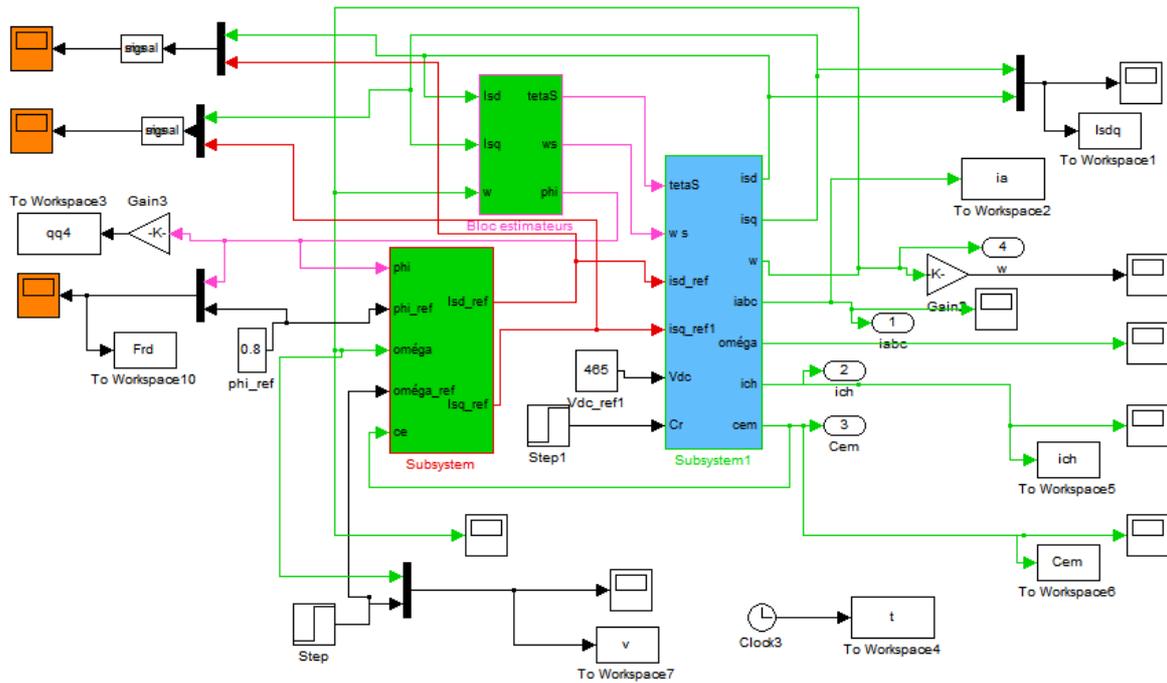


Figure 3.15 : schéma bloc de la commande vectorielle de la MAS.

### III.12.1 Résultats de simulation

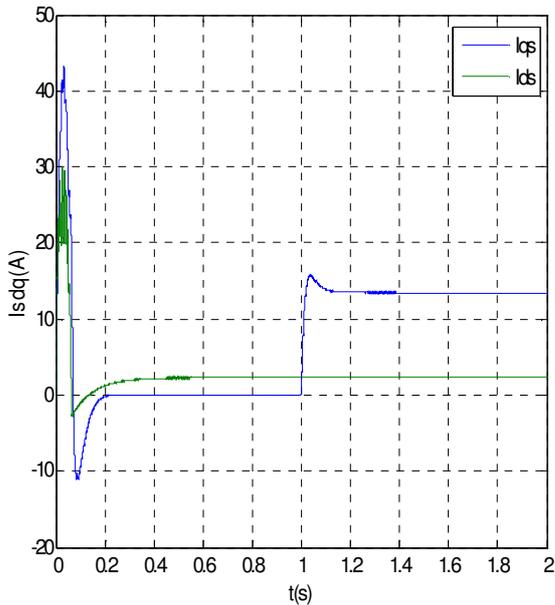


Figure 3.18: Courants statorique (Isd,Isq).

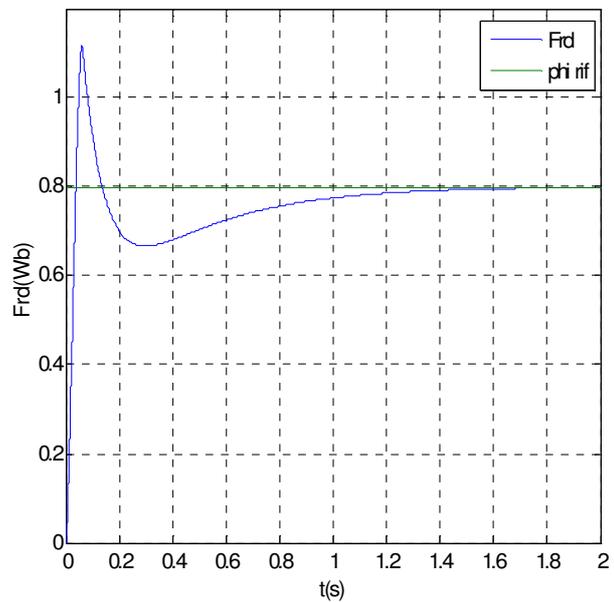


Figure 3.19: Flux rotorique

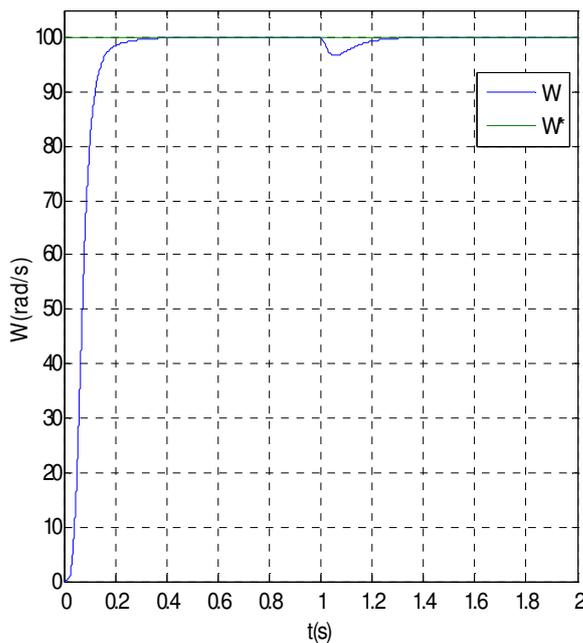


Figure 3.16 : Vitesse de rotation

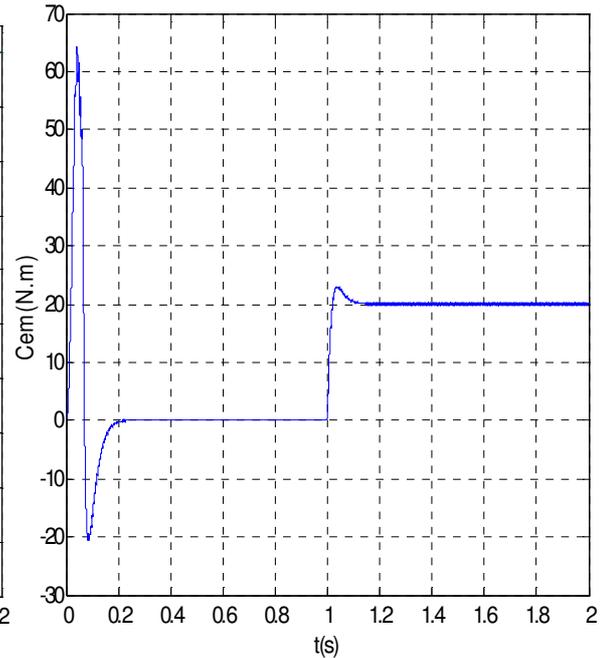


Figure 3.17 : Couple électromagnétique

### III.12.2 Interprétation des graphes

La machine commandée vectoriellement par orientation de flux rotorique, est mise en évidence par simulation numérique sous environnement *MATLAB/ SIMULINK*. Les figures montrent les performances de réglage lors d'un démarrage à vide suivi de l'application à l'entrée de commande un échelon de vitesse de 100(rad/s) et d'un couple de charge à  $t = 1$  s ( $C_r=20$ Nm). On remarque que dans le fonctionnement à vide, la vitesse converge vers sa valeur de référence sans dépassement avec un temps de réponse égale à 0.4s. Après l'application de la charge on remarque que la vitesse présente une petite perturbation qui est rejetée rapidement, puis rejoint sa valeur de référence sans erreur.

Le couple subit un pic aux premiers instants de démarrage, puis atteint la valeur du couple résistant avant et après l'application de la charge. On remarque que le courant  $I_{ds}$  reste constant et le courant  $I_{qs}$  suit l'allure du couple  $C_{em}$  ce qui justifie le découplage entre le flux et le couple et que les composantes du flux rotorique obéissent au principe de la commande vectorielle.

### III.13 Application du cycle de conduite au VE avec la technique de la commande vectorielle

III.13.1 Le Schéma bloc

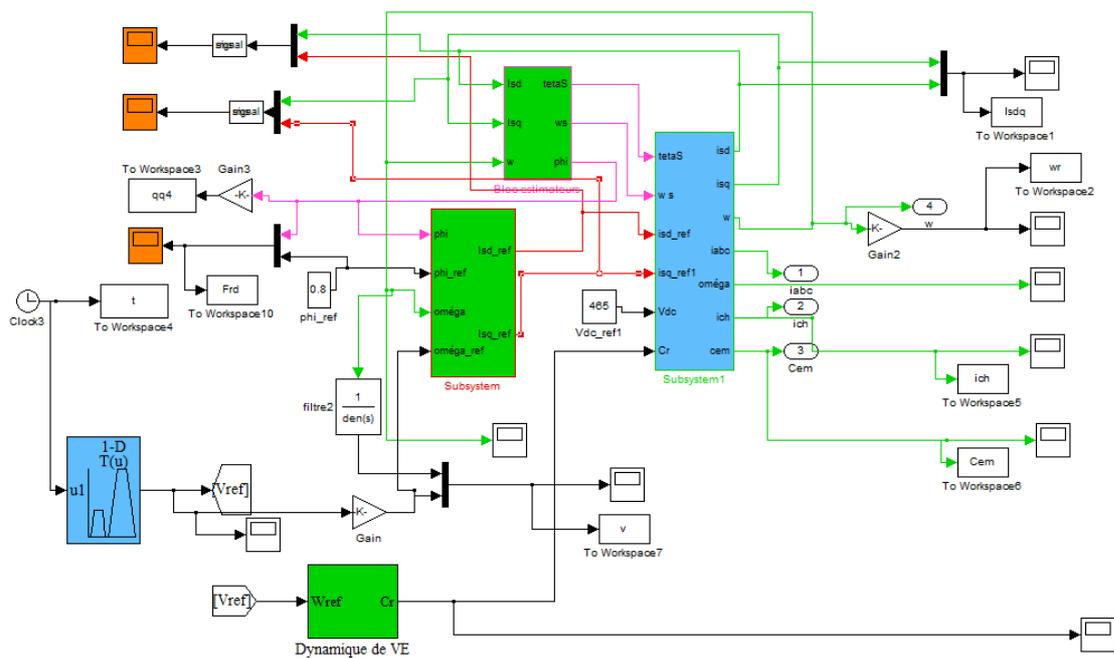


Figure 3.20: Schéma bloc sous MATLAB Simulink de VE avec la commande vectorielle.

III.13.2 Résultats de simulation

- La ponte 5%

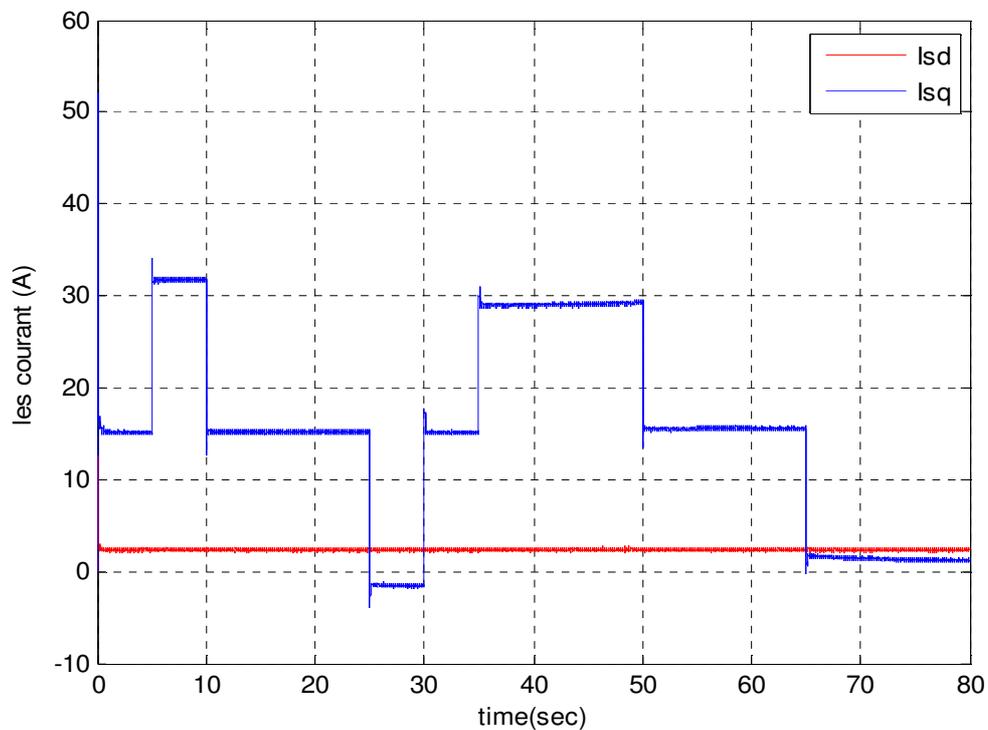


Figure 3.21 : Les courants (Isd, Isq).

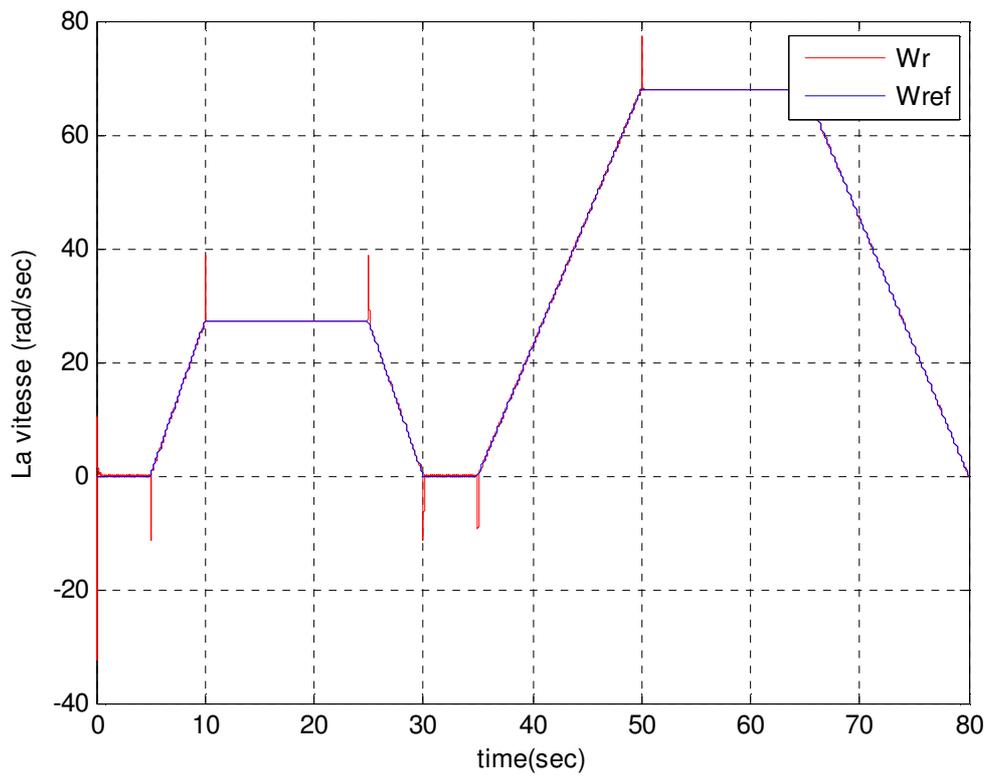


Figure 3.22 : La vitesse de rotation.

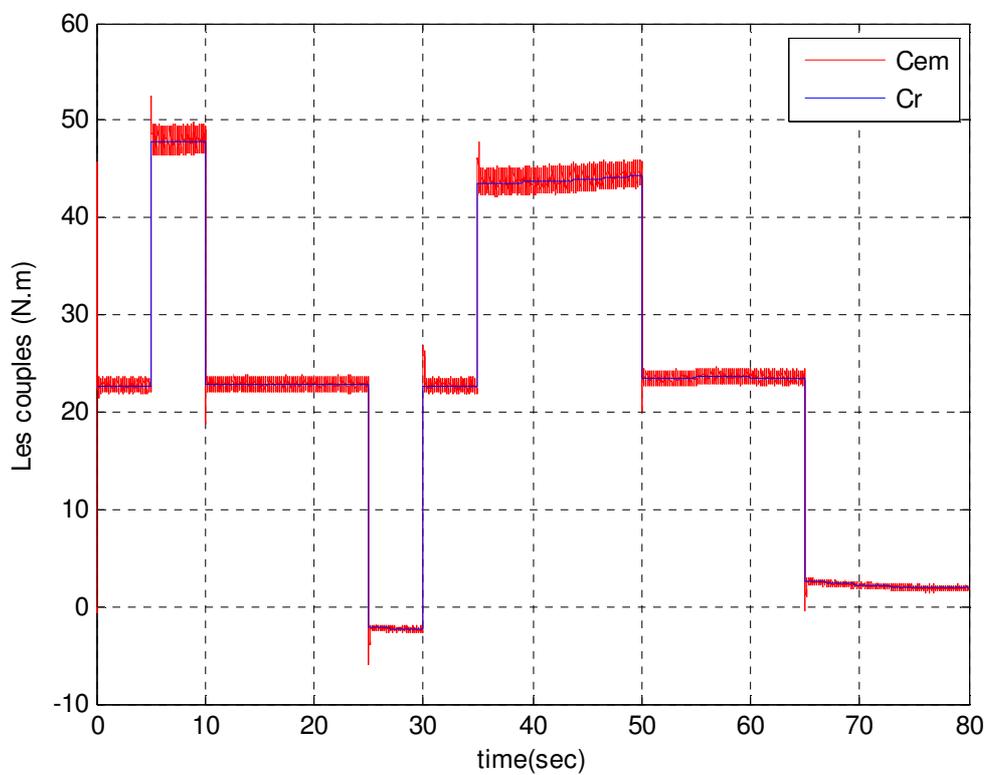


Figure 3.23 : Couple électromagnétique

- La pente 7%

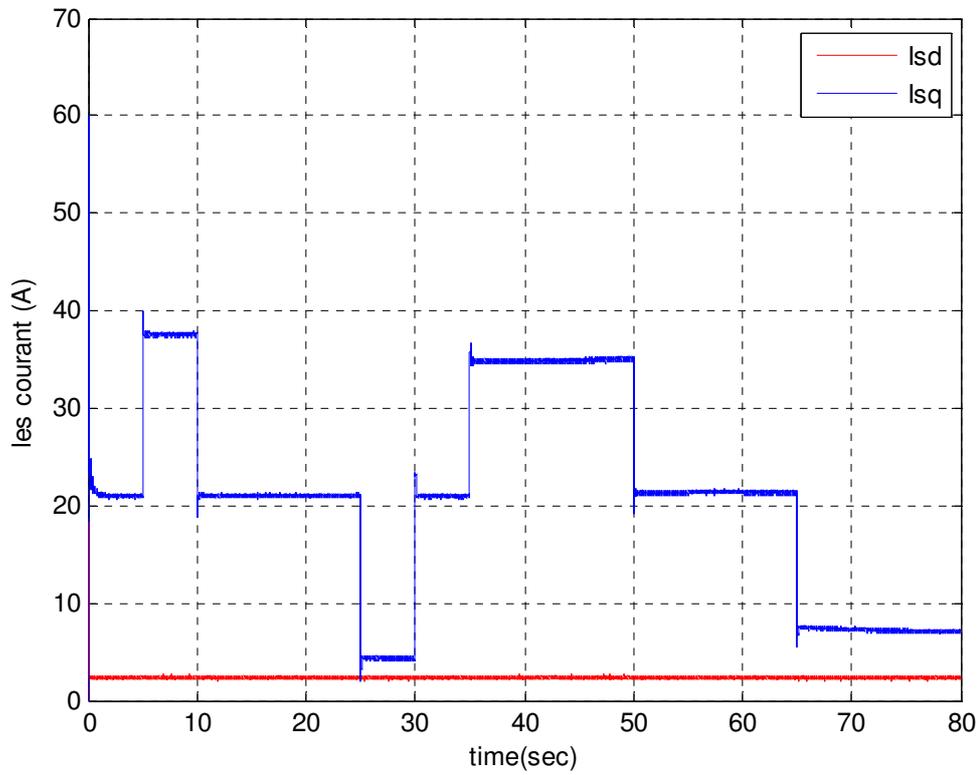


Figure 3.24 : Les courants (Isd, Isq).

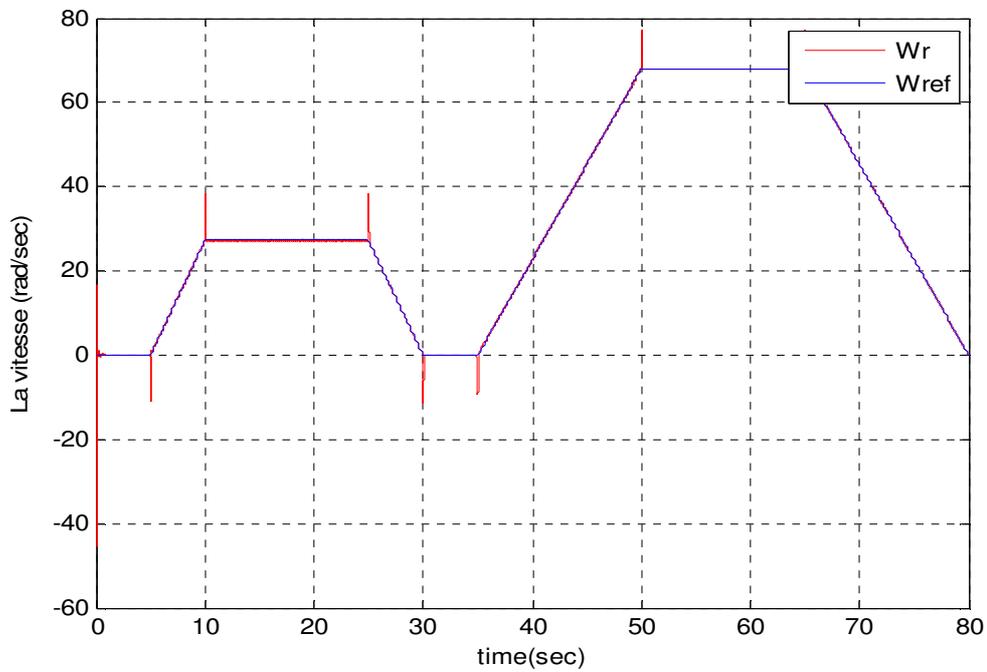


Figure 3.25 : La vitesse de rotation.

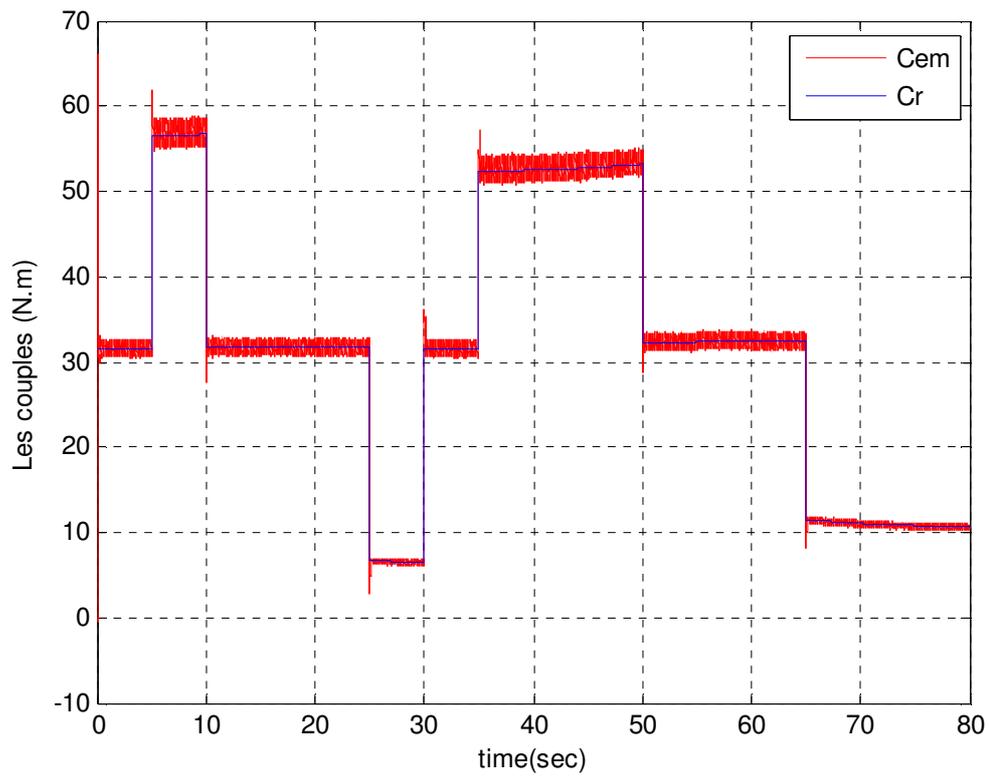


Figure 3.26 : Couple électromagnétique

- La ponte 10%

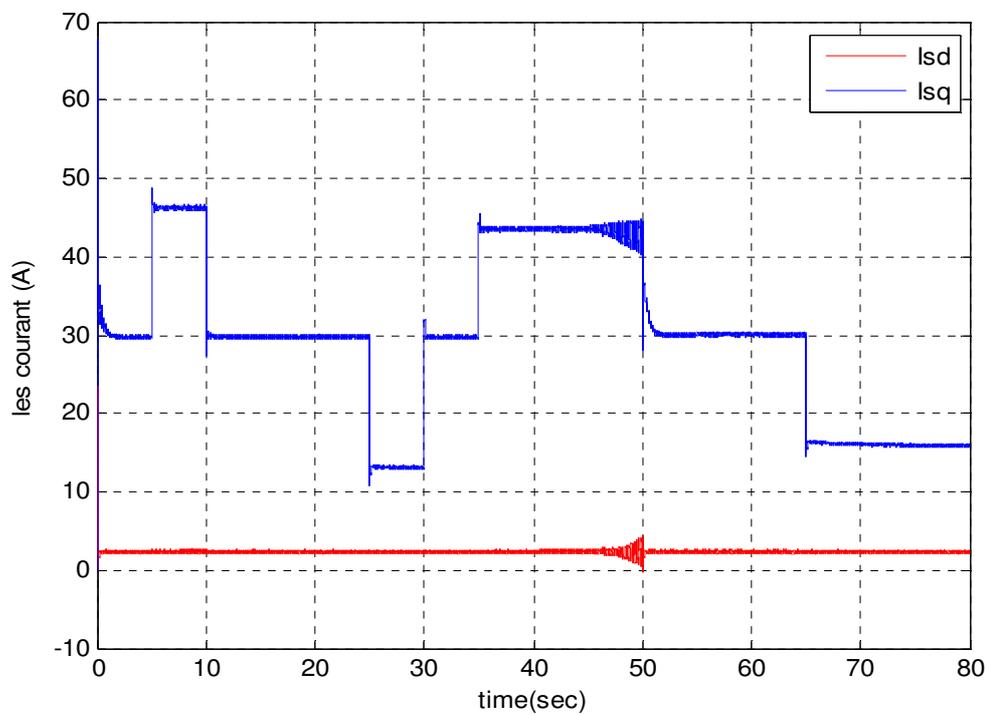


Figure 3.27 : Les courants (Isd, Isq).

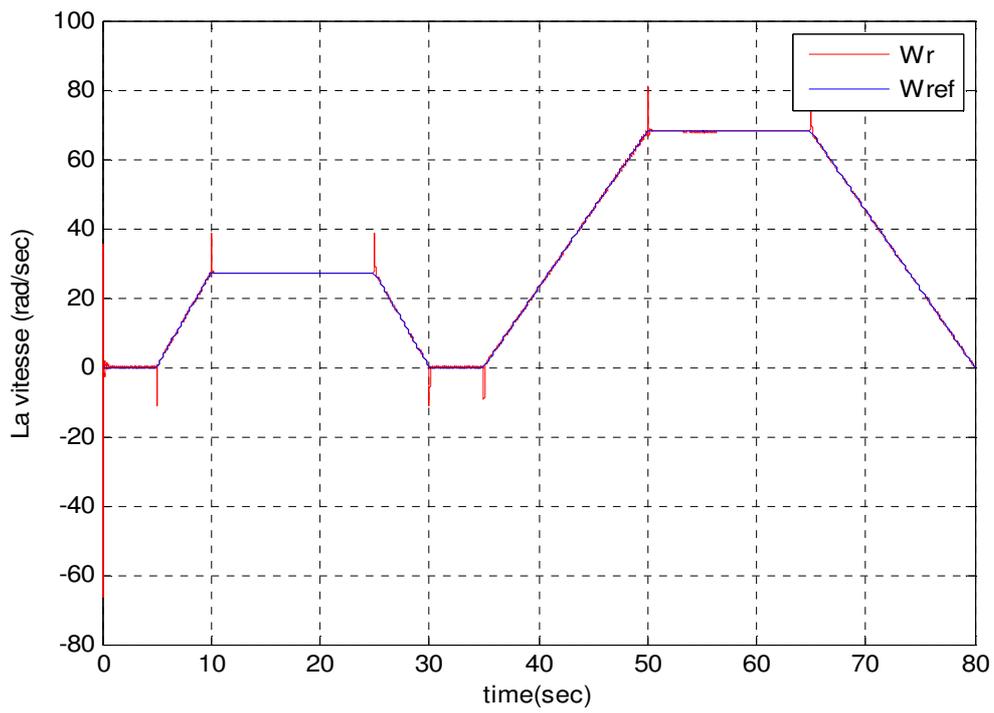


Figure 3.28 : La vitesse de rotation.

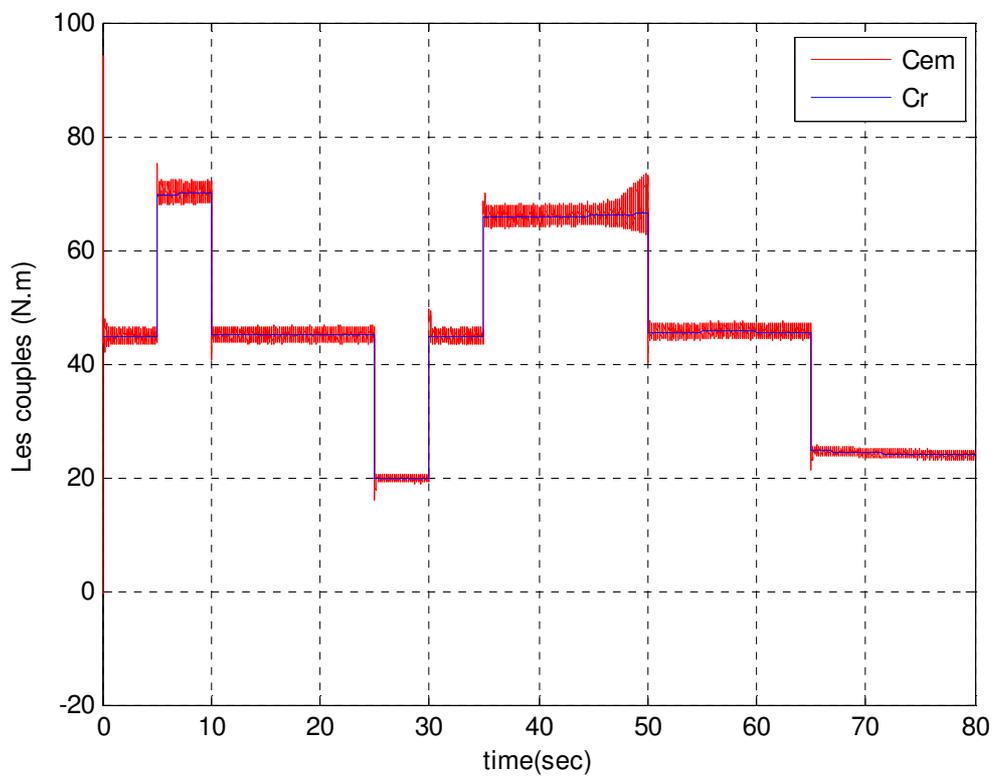


Figure 3.29 : Couple électromagnétique

### III.13.3 Interprétation des résultats de simulations

Dans les figures (3.21) (3.24) et (3.27) le courant direct est fixé presque à zéro peu importe la contrainte utilisé, cela est dû à la commande vectorielle appliqué.

Le courant en quadrature figures (3.21) (3.24) et (3.27) est l'image de couple électromagnétique (3.23) et (3.26) (3.29).

On remarque dans les figures (3.22) (3.25) (3.28) que la vitesse de véhicule suit parfaitement sa référence qui est définie par le cycle de conduite mais lorsqu'on change l'accélération on avoir un petit pic à cause de changement d'état.

Les courants et les couples électromagnétique augment proportionnellement avec l'augmentation de la ponte.

### III.14 Conclusion

Au cours de ce dernier chapitre nous avons simulé la MAS, puis nous avons présenté la commande vectorielle appliquée à notre MAS alimenté par onduleur de tension afin de rendre son comportement similaire à celui de la machine à courant continu.

La vitesse et les courants sont contrôlés via des correcteurs de type proportionnel intégral (PI) dont le dimensionnement est basé sur la méthode de placement des pôles. Vers la fin nous avons attaqué la dynamique du VE et on a appliqué le cycle de conduit à ce dernier avec la technique de la commande vectorielle. On conclut que le réglage de la vitesse par le régulateur PI donne des résultats acceptables.

### Conclusion générale

Le véhicule électrique a connu plusieurs étapes qui lui ont permis d'évoluer au cours des temps. Bien sur plusieurs facteurs rentent en compte, parfois ces derniers n'ont pas agi en sa faveur. Le travail dans ce mémoire donne comme but de l'étude et la simulation des véhicules électrique.

Pour aborder notre étude nous avons présenté au premier chapitre une généralité sur les véhicules électriques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu les différents parties de la chaine d'entraînement du véhicule électrique et leur modélisation, quelque soit la modélisation de la MAS avec transformation de Park, la modélisation de la MASP et la dynamique de VE avec ces différentes contraintes.

Dans le troisième chapitre de notre étude, nous avons simulé un véhicule électrique à base de MAS à cage d'écureuil sans onduleur, ensuite nous avons fait la simulation de la MAS alimenté par un onduleur triphasé avec la commande vectorielle qui a permis d'imposer à la machine des comportements semblables à ceux de la machine à courant continu. Nous avons appliqué la commande vectorielle par le régulateur classique PI qui a donné de bonnes performances en termes de stabilité, rapidité et précision.

Vers la fin nous avons simulé la MAS avec l'application d'un cycle de conduite au spécifique aux VEs. Les résultats de simulations montrent que la commande vectorielle a donné des résultats acceptables par rapport à la performance de stabilité qui consiste à un bon suivi de trajectoire (vitesse).

### Perspectives

- Construire un modèle qui va prendre en charge la gestion de la batterie du VE.
- Intégrer une commande intelligente.

# ANNEXE

---

## 1. PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

### *Caractéristiques principales de la machine*

- Fréquence statorique nominale 60 Hz
- Nombre de paires de pôles 2

### *Paramètres électriques*

- Résistance d'une phase du stator  $R_s=4\Omega$
- Résistance d'une phase du rotor  $R_r=1.143\Omega$
- Inductance propre d'une phase statorique  $L_s=0.3676H$
- Inductance propre d'une phase rotorique  $L_r=0.3676 H$
- Inductance mutuelle  $M=0.3439H$

### *Paramètres mécaniques*

- Moment d'inertie des masses tournantes  $J=0.03 \text{ Kgm}^2$
- Coefficient de frottement  $f=0.0009 \text{ Nm/rad/sec}$

## 2. Les Paramètres de la dynamique de véhicule utilisent

Masse volumique de l'air  $\rho=1.28 \text{ kg/m}^3$

Surface  $S=1.05 \text{ m}^2$

Coefficient de pénétration dans l'air  $C_x=0.32 \text{ SI}$

Masse de véhicule  $M_v=600 \text{ kg}$

Force due à la gravité  $g=9.81 \text{ m/s}^2$

## 3. Le régulateur PI

- *De courant*

$$K_p=10.5$$
$$K_i=30$$

- *De vitesse*

$$K_p=1.6$$
$$K_i=45$$

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] AIMAN, NOUCHE. «*contribution au développement d'un Simulateur pour les véhicules électrique routier* », thèse doctorat en sciences pour l'ingénieur, génie électrique,2008
- [2] P. Degobert,«*Pollution atmosphérique, réduction des émissions dues au moteur*», Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique Doc. B 2 714.
- [3] GUIENELL, SOUFFRAN, «*dimensionnement de la chaine de traction d'un véhicules électrique hybride basé sur une modalisation stokastiques de ses profils de mission*», thèse doctorat en électronique et génie électrique 2012, université NANTES.
- [4] M. Kant. La voiture électrique, Techniques de l'ingénieur.2005. D5562
- [5] B. Multon. Motorisation des véhicules électriques, Techniques de l'ingénieur.2001. (E3996)
- [6] Djamel be noudjit. «*Contribution a l'optimisation et a la commande d'un système de propulsion*». Thèse doctorat en sciences en génie électrique.2010
- [7] HALBAOUI, MOHAMED YACIN, «*véhicule hybride, hybridation thermique électrique*» .MASTERE 2012, UNIVERSITE Dr. Yahia Farès de Médéa.
- [8] Walid HANKACHE. «*Gestion Optimisée de l'Énergie Électrique d'un Groupe Électrogène Hybride à Pile à Combustible*». L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE. Thèse doctorat.2008.
- [9] DANLLEA, «*conception des moteur a réactance variable a commutation électronique pour traction d'un véhicules électrique légers* », Thèse doctorat 2011, ECOL CENTRAL DE LILE.
- [10] MARIE-LOUPICHERT, «*évaluation environnemental du véhicules électrique, méthode et application*», Thèse doctorat.2010. ECOL NATIONLE SUPERIEUR DES MINES SAINT-ETIENNE.

[11] LOIC BOULON, «*modélisation multi-physique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour des véhicules électrique hybride approche systématique pour la gestion d'énergie* », Thèse doctorat.2009, UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMITE.

[12] MOSDAL (mai2003), «*transport électrique routier, véhicules électrique à Pile à Combustible*», Techniques de l'ingénieur (DOC :5570)

[13] NOELLE JANIAUD, «*en vue de modélisation de système de puissance de véhicules électrique en régime transitoire l'optimisation de l'autonomie des performances et des couts associé* », Thèse doctorat.2011, ECOLE DOCTORAT (SITZ)

[14] :[https://www.dspace.com/fr/fra/home/products/systems/ecutest/configuration\\_exampl/cus\\_for\\_electric\\_engines.cfm](https://www.dspace.com/fr/fra/home/products/systems/ecutest/configuration_exampl/cus_for_electric_engines.cfm)

[15]. A.BOUCHA, '*Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarqué*', Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf,

[16].I.MARIF, H.ABDAT, "La *commande en vitesse d'un véhicule électrique* "obtention du diplôme de MASTER, Université de Tlemcen,2019.

[17].B.Multon, L.Hirsinger, "*Problème de la motorisation d'un véhicule électrique*", article, École Normale Supérieure De Cachan, 1995.

[18].F.ROLLAND, '*Simulation et optimisation paramétrique de la chaîne de motorisation d'un véhicule électrique*', Mémoire en génie électrique, canada, 2011.

[19].S.KHENFOUR, Y.SMAILI,"*Contrôle commande d'un véhicule électrique à base d'un moteur synchrone a aimants permanents*", Mémoire master académique, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2018.

[20].User Manual, "*DSP Based Electric Drives Laboratory*", Département of Electrical and Computer Engineering University of Minnesota.

[21]. Mustapha KHELIFI, Ahmed SEKOUR, "*Etude de la carte DSPACE DS1104*", Projet de Fin d'Etudes, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2006

- [22].A. Laguidi, "*Réalisation, Conception et Commande d'un Véhicule Electrique*", Mémoire Magister Université de Béchar, 2011.
- [23]. "*Cours Sur les Hacheur*", Département de Génie Electrique et Informatique Industrielle.
- [24]. R. TRIGUI, "*Motorisation Asynchrone pour Véhicule Electrique*", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Paris, 1997.
- [25].Y BELKACEMI,O.CHIBANE, '*Commande fuzzy-neurone d'un véhicule électrique à base d'une MSAP soumis à des incertitudes et des perturbations externes*', Mémoire de fin d'étude, Université Akli Moand Oulhadj-bouira, 2020.
- [26].F.Hadjer « *Commande adaptative floue d'un moteur Asynchrone* » mémoire de master, université de Mohamed Boudiaf- M'sila 2016
- [27].C.Djamel, «*Commande d'une Machine Asynchrone par Logique Floue*», mémoire master, Université d'EL-Oued, 2014.
- [28].K.Sabour, S.Elazazi., « *Commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation* » mémoire master, université AKLI Mohaned Oulhadj de Bouira, année 2015.
- [29].*Site internet*, WWW.MELEEC.ORG, extraie Mars 2018
- [30].Barros, J.-C, "*Application de la logique Floue à la Commande Optimale du Moteur Asynchrone*», Thèse de doctorat, Université Marseille III, France, 2003.
- [31].W.Bendemmagh, « *Commande de la machine asynchrone par la cascade hypo synchrone à base des logiciels s'implorer et matlab* » mémoire de master, Université de Sétif 1 2013.
- [32].M.Abbas, M. Mechentel, « *modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux application à l'énergie éolienne* », mémoire de magister. Ecole nationale polytechnique, Alger, 2006.
- [33].F.Mezaache et A.Menasri, « *Implémentation Des "RNA" Sur "FPGA" Pour Le diagnostique des défaillances de la machine asynchrone en utilisant la co-simulation*». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université de M'sila. 2008/2009.
- [34].M. Hamata omar et m. Louchen nourdine « *Contribution a la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentation* » Mémoire d'ingénieur, université de Batna [2003].
- [35].Bensmail Samia « *Optimisation Et Gestion d'Energie D'un Système Hybride A Energies Renouvelables* », thèse de doctorat, Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information(LTII), Université A.MIRA-BEJAIA,201/2017