

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université A. MIRA - Bejaia*

**Faculté de Technologie**

**Département : Génie Electrique**

**Option : Electromécanique**



**Projet de fin du cycle**  
**Pour l'obtention du diplôme de**  
**Master en électromécanique**

***Thème***

***Etude des éléments de la chaîne de  
traction d'un véhicule électrique à  
base d'une machine asynchrone  
double étoile***

**Réalisé par :**

**MLLE: BENBOUYA BASMA**

**MLLE : OUABBAS DIHIA**

**Encadré par :**

**Mr. M. LARBA**

**Mme H.SMAIL**

***Année universitaire : 2018 / 2019***

# *Remerciement*

*En premier lieu, nous tenons à remercier le bon Dieu, notre créateur pour avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail.*

*Nos très chères et belles familles et plus particulièrement nos parents. Qui nous ont soutenus durant nos études.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à nos encadreurs Mr M.LARBAA ainsi Mme H SMAIL. pour leur disponibilité, leurs conseils et leurs précieuses informations tout au long du projet.*

*Nous remercions également les membres de jury ainsi tous les enseignants nous citons : Mr K.GHEDAMSI, Mr H. AMIMEUR, Mr N. MEBARKI et Mr A.OUBELAID.*

*Ces remerciements ne seraient pas complets si n'apparaissait pas tous les membres du département génie électrique que nous avons eu l'occasion de côtoyer durant nos études.*

*Un grand merci également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Dédicaces

*Avec ma gratitude et tout mon amour, Je dédie ce modeste travail  
À mes chers parents, en témoignage de ma reconnaissance pour leur patience,  
leur sacrifice et leur soutien indéfectible tout au long de mes études.*

*Que dieu leur prête santé.*

*À mes chères sœurs : **Karima, Nassima, Dalila et Ghania***

*Ainsi ma chère binôme **DIHIA.O***

*À mes adorables amies :*

***Lynda, Sonia, Imane, Wassila, Idir, Wassim, Amina,***

***Yasmina, Lynda et Assia***

*Merci d'avoir toujours été là pour moi, Votre amitié est extrêmement précieuse.*

*À toute la promotion Electromécanique 2018-2019.*

*À tous ceux que j'apprécie et je n'ai pas mentionné mais que je n'ai pas oublié.*

**BASMA.B**



# *Dédicaces*

*Avec ma gratitude et tout mon amour, Je dédie ce modeste travail  
À mes chers parents, en témoignage de ma reconnaissance pour leur patience,  
leur sacrifice et leur soutien indéfectible tout au long de mes études.*

*Que dieu leur prête santé.*

*À mon cher et unique frère : **Saïd.***

*Qui m'a soutenue.*

*Ainsi ma chère binôme **BASMA.B***

*À mes adorables amis :*

***Walid, Mourad, Toufik, Lynda, Kenza et Lynda***

*Merci d'avoir toujours été là pour moi, Votre amitié est extrêmement précieuse.*

*À toute la promotion Electromécanique 2018-2019.*

*À tous ceux que j'apprécie et je n'ai pas mentionné mais que je n'ai pas oublié.*

**DIHIA.O**



# Sommaire

---

## Liste des abréviations et notations

## Liste des figures

## Liste des tableaux

Introduction générale.....1

## Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

I.1 Introduction .....	3
I.2 Historique des véhicules électriques .....	3
I.3 Définition d'un VE.....	5
I.4 Architecture classique d'un VE.....	6
I.5 Classification d'un véhicule électrique .....	8
I.5.1 Véhicule électrique à moteur roue.....	8
I.5.2 Véhicule électrique à Moteur fixé au châssis .....	8
I.5.2.1 Véhicule électrique à mono-moteur.....	9
I.5.2.2 Véhicule électrique à bi-moteur.....	9
I.6 Eléments de la chaîne de traction d'un VE .....	10
I.6.1 Sources d'énergies électriques embarquées .....	10
I.6.1.1 Batteries .....	10
I.6.1.2 Super-condensateur.....	11
I.6.1.3 Pile à combustible .....	12
I.6.2 Convertisseurs statiques .....	13
I.6.3 Moteurs électriques .....	13
I.6.3.1 Moteurs à courant continu (MCC).....	14
I.6.3.2 Moteur synchrone (MS).....	14
I.6.3.3 Moteur asynchrones (MAS).....	14
I.7 Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique .....	15
I.8 Enjeux liés au développement d'un VE .....	15
I.8.1 Véhicule électrique c'est du propre.....	15
I.8.2 Evolution des coûts de la batterie d'un VE .....	16
I.8.3 Bilan économique comparé du VE.....	17
I.9 Conclusion.....	18

# Sommaire

---

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

II.1 Introduction.....	19
II.2 Modélisation des sources d'énergies électriques embarquées.....	20
II.2.1 Modélisation d'une Batterie.....	20
II.2.1.1 Choix de la batterie.....	20
II.2.1.2 Modèle de la batterie.....	20
II.2.1.3 Modèle de la capacité.....	21
II.2.1.4 Tension de la batterie en régime de charge.....	21
II.2.1.5 Tension de la batterie en régime de décharge.....	21
II.2.2 Modélisation d'un super condensateur.....	21
II.2.2.1 modèle de super condensateur.....	22
II.2.2.2 Tension et énergie à vide.....	22
II.2.2.3 Tension et énergie en charge.....	23
II.2.2.4 Tension et capacité de Pack.....	23
II.2.3 Modélisation d'une pile à combustible type PEM.....	23
II.2.3.1 Modèle d'une pile à combustible.....	23
II.2.3.2 Polarisation d'activation.....	24
II.2.3.3 Polarisation de concentration.....	25
II.3 Modélisation du convertisseur statique.....	26
II.3.1 Modèle d'un onduleur.....	26
II.3.2 Les tensions composées.....	26
II.3.3 Les tensions simples.....	27
II.4 Convertisseur de puissance (Hacheur élévateur-abaisseur).....	27
II.5 Modélisation de la machine utilisée.....	27
II.5.1 Description de la machine asynchrone à double étoile.....	27
II.5.1.1 Définition.....	27
II.5.1.2 Constitution.....	28
II.5.1.3 Principe de fonctionnement.....	29
II.5.1.4 Applications de la Machine asynchrone double étoile.....	29
II.5.1.5 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone double étoile.....	30
II.5.2 Représentation de la machine asynchrone double étoile.....	30
II.5.3 Hypothèses simplificatrices.....	31
II.5.4 Modèle triphasé de la machine asynchrone double étoile.....	32

# Sommaire

---

II.5.4.1 Equations électriques .....	32
II.5.4.2 Equations magnétique.....	34
II.5.4.3 Equation mécanique .....	36
II.5.4.4 Expression du couple électromagnétique .....	36
II.5.5 Modèle biphasé de la machine asynchrone double étoile .....	36
II.5.5.1 Transformation de Park .....	36
II.5.5.2 Choix du référentiel .....	39
II.5.6 Modèle biphasé de la MASDE liée au système d'axes « $d, q$ » .....	40
II.5.7 Puissance absorbée et couple électromagnétique.....	42
II.5.7.1 Puissance absorbée .....	42
II.5.7.2 Expression du Couple électromagnétique .....	42
II.6 Conclusion .....	43
 <b>Chapitre III : simulation des éléments de la chaîne de traction</b>	
III.1 Introduction .....	44
III.2 Simulation de la Batterie .....	44
III.2.1 Schéma bloc .....	44
III.3 Simulation de super condensateur .....	45
III.3.1 Schéma bloc .....	45
III.3.2 Résultats de simulation .....	46
III.4 Simulation de la pile à combustible.....	46
III.4.1 Schéma bloc .....	46
III.4.2 Résultats de simulation .....	47
III.5 Simulation d'une machine asynchrone double étoile .....	47
III.5.1 Schéma bloc .....	48
III.5.2 Résultats de Simulation .....	49
III.6 Système de traction d'un VE .....	53
III.6.1 Commande MLI.....	53
III.6.2 Schéma bloc .....	54
III.6.3 Résultats de Simulation .....	55
III.6.4 Interprétation des résultats .....	56
III.7 Conclusion .....	57

# Sommaire

---

## Chapitre IV : Commande Vectorielle de la machine asynchrone double étoile

IV.1 Introduction .....	58
IV.2 Principe de la commande vectorielle .....	58
IV.3 Choix d'orientation du flux .....	59
IV.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle.....	60
<b>IV.4.1 Commande vectorielle directe .....</b>	<b>60</b>
<b>IV.4.2 Commande vectorielle indirecte.....</b>	<b>60</b>
IV.5 Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse .....	60
IV.6 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse .....	63
<b>IV.6.1 Bloc de défluxage .....</b>	<b>63</b>
<b>IV.6.2 Régulateur de vitesse.....</b>	<b>64</b>
IV.7 Simulation de la commande de la MASDE.....	64
<b>IV.7.1 Schéma bloc.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.7.2 Résultats de la simulation .....</b>	<b>66</b>
<b>IV.7.3 Interprétation des résultats de la simulation de la commande .....</b>	<b>68</b>
IV.8 Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	70

## Référence bibliographie

## Annexe



# Liste des abréviations et notations

---

## A. Principales abréviations

VE : Véhicule électrique

BV : Boîte de vitesse

MCC : Moteur à courant continu

MS : Moteur synchrone

MAS : Moteur asynchrone

MASDE : Moteur asynchrone double étoile

DC/DC : Hacheur

DC/AC : Onduleur

AC/DC : redresseurs

Batt : Batterie chimique

SC : Super condensateur

PAC : Pile à combustible

DC/DC : Hacheur

DC/AC : Onduleur

AC/DC : redresseurs

R: Réducteur

r : Roue

D : Un différentiel

EDC : L'état de charge

## B. Principales notations

$U$  : Tension de la source (V)

$U_s$  : Tension alternatif (V)

$I$  : Courant continue (A)

## Liste des abréviations et notations

---

$I_s$ : Courant alternatif (A)

$C_m$  : Couple mécanique (N.m)

$C_{rg}$  : Couple roue gauche (N.m)

$C_{rd}$  : Couple roue droite (N.m)

$\Omega_m$  : Vitesse mécanique (rad/s)

$\Omega_{rg}$ : Vitesse roue gauche (rad/s)

$\Omega_{rd}$  : Vitesse roue droite (rad/s)

$E_{batt}$  : Tension à vide de la batterie (V)

$V_{batt}$ : Tension aux bornes de la batterie (V)

$R_{batt}$  : Résistance interne de la batterie ( $\Omega$ )

$I_{batt}$  : Courant de la batterie (A)

$C_{batt}$  : La quantité d'énergie (joule)

$Q_d$  : La quantité de charge manquante à la batterie (C)

$V_{sc}$  : La tension aux bornes d'un super condensateur (V)

$I_{sc}$  : Courant du super condensateur (A)

$E_{sc}$  : L'énergie contenue dans le super condensateur (joule)

$P_{sc}$  : La puissance du super condensateur (watt)

$C_{sc}$  : Capacité du super condensateur (F)

$V_0$  : Tension à vide du super condensateur (V)

$U_{PAC}$  : La tension aux bornes d'une pile à combustible (V)

$I_{PAC}$ : Courant de fonctionnement de la pile à combustible (A)

$V_{act}$ : Polarisation d'activation (V)

## Liste des abréviations et notations

---

$V_{ohm}$ : Polarisation ohmique (V)

$V_{conc}$  : Polarisation de Concentration (V)

$P_{H_2}^*$ : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm)

$P_{O_2}^*$  : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm)

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ : sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible

$A$  : La surface active de la pile (cm)<sup>2</sup>

$B$  : Une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement

$J$  : La densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm<sup>2</sup>)

$J_{max}$  : La densité de courant maximale (A/cm<sup>2</sup>)

$t$  : Le temps (s)

$T$  : Température opératoire absolue de la pile (K)

$as, bs, cs$  : Les trois phases statorique

$ar, br, cr$ : les trois phase rotorique

$V_{a,b,cs1}$ : Tensions triphasés étoile 1 (V)

$V_{a,b,cs2}$  : Tensions triphasés étoile 2 (V)

$V_{a,b,cr}$  : Tensions triphasés rotoriques (V)

$V_{d,qs1}$  : Tensions de l'étoile 1 dans le référentiel de Park «d, q» (V)

$V_{d,qs2}$  : Tensions de l'étoile 2 dans le référentiel de Park «d, q» (V)

$V_{d,qr}$  : Tensions rotoriques dans le référentiel de Park «d, q» (V)

$i_{a,b,cs1}$ : Courants triphasés de l'étoile 1 (A)

$i_{a,b,qs2}$  : Courants triphasés de l'étoile 2 (A)

$i_{a,b,cr}$  : Courants triphasés rotoriques (A)

$i_{d,qs1}$  : Courants de l'étoile 1 dans le référentiel de Park «d, q» (A)

## Liste des abréviations et notations

---

$i_{d,qs2}$  : Courants de l'étoile 2 dans le référentiel de Park «d, q » (A)

$i_{d,qr}$  : Courants rotoriques dans le référentiel de Park «d, q » (A)

$\varphi_{a,b,cs1}$  : Flux triphasés de l'étoile 1 (Wb)

$\varphi_{a,b,cs2}$  : Flux triphasés de l'étoile 2 (Wb)

$\varphi_{a,b,cr}$  : Flux triphasés rotorique (Wb)

$\varphi_{d,qs1}$  : Flux de l'étoile 1 dans le référentiel de Park «d, q » (Wb)

$\varphi_{d,qs2}$  : Flux de l'étoile 2 dans le référentiel de Park «d, q » (Wb)

$\varphi_{d,qr}$  : Flux rotoriques dans le référentiel de Park «d, q » (Wb)

$R_{a,b,cs1}$  : Résistances des trois phases statoriques de l'étoile 1 ( $\Omega$ )

$R_{a,b,cs2}$  : Résistances des trois phases statoriques de l'étoile 2 ( $\Omega$ )

$\varphi_{a,b,cr}$  : Résistances des trois phases rotorique ( $\Omega$ )

$L_m$  : Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et l'étoile 2 (H)

$L_{mS}$  : Inductance mutuelle cyclique stator (H)

$L_{mr}$  : Inductance mutuelle cyclique rotor (H)

$L_{sr}$  : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (H)

$L_r$  : Inductance rotorique (H)

$L_{s1}$  : Inductance statoriques de l'étoile 1 (H)

$L_{s2}$  : Inductance statoriques de l'étoile 2 (H)

$L_{f1}$  : Inductance de fuite statorique de l'étoile 1 (H)

$L_{f2}$  : Inductance de fuite statorique de l'étoile 2 (H)

$L_{fr}$  : Inductance de fuite rotorique (H)

$P_a$  : Puissance absorbée par la MASDE (W)

$P_u$  : Puissance utile fournie par la machine (W)

$P_f$  : Pertes dans le fer (W)

## Liste des abréviations et notations

---

$P_{jr}$  : Pertes joule rotoriques (W)

$P_{js}$  : Pertes joule statoriques (W)

$P_m$  : Puissance mécanique (W)

$P_{mc}$  : Puissance mécanique fourni à la charge (W)

$W$  : Energie électromagnétique (Joule)

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (N.m)

$C_r$  : Couple résistant(N.m)

$C_m$  : Couple mécanique du moteur(N.m)

$J$  : Inertie totale des parties tournantes (Kg.m<sup>2</sup>)

$P$  : Nombres de pair de pôles

$g$  : Glissement

$F$  : Fréquence de réseau (Hz)

$N_r$  : Vitesse asynchrone (tr/min)

$N_s$  : Vitesse synchrone (tr/min)

$\Omega_r$  : Vitesse de rotation du rotor (rad/s)

$\Omega_s$  : Vitesse de rotation champ statorique (rad/s)

$\omega_{coor}$  : Vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé (rad/s)

$\omega_{gl}$  : Pulsation électrique fondamentale du glissement (rad/s)

$\omega_r$  : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotoriques (rad/s)

$\omega_s$  : Pulsation électrique fondamentale des grandeurs statoriques (rad/s)

$\theta_{géo}$  : Position géométrique de rotation

$\theta_{éle}$  : Position électrique

$\theta_s$  : Position électrique relatif aux grandeurs électriques statoriques

$\theta_r$  : Position du rotor par rapport à l'étoile 1

## Liste des abréviations et notations

---

$\theta_{r-\alpha}$ : Position du rotor par rapport à l'étoile 2

$\eta$  : Rendement

$K$  : Coefficient de couplage magnétique stator-rotor

$\varphi_f$  : Flux imposé par le courant d'excitation  $i_f$

$i_a$  : Courant d'induit ;

$k, k'$  : Constante.

$k_{pv}, k_{iv}$ : Gain proportionnel et intégrale du régulateur de vitesse

# Liste des figures

---

## Chapitre I.1: Généralités sur les véhicules électriques

Figure I.1 : L'évolution des véhicules électriques en 19 <sup>ème</sup> siècle.....	04
Figure I.2 : Composant d'un véhicule électrique.....	06
Figure I.3 : Chaîne de traction d'un véhicule électrique.....	07
Figure I.4 : Roue englobant un moteur-roue.....	08
Figure I.5 : Architecture d'un véhicule électrique mono-moteur.....	09
Figure I.6 : Architecture d'un véhicule électrique bi-moteur.....	09
Figure I.7 : Batterie.....	11
Figure I.8 : Super condensateur.....	12
Figure I.9 : Pile à combustible.....	13
Figure I.10 : Externalités des VT / VE selon les milieux et l'énergie utilisée gCO <sub>2</sub> /kWh dans les années prochaines.....	16
Figure I.11 : Coût des batteries par kW/h au fil des années.....	17
Figure I.12 Évaluation du coût total des différents véhicules .....	18

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

Figure II.1 : Topologie de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.....	19
Figure II.2 : Schéma équivalent de la batterie.....	20
Figure II.3 : Schéma équivalente de super condensateur.....	22
Figure II.4 : Schéma équivalent de pile à combustible.....	23
Figure II.5 : Schéma d'un onduleur de tension triphasée.....	26
Figure. II.6 : Machine asynchrone double étoile.....	28
Figure. II.7 : Représentation des enroulements de la MASDE.....	31
Figure II.8 : Représentation schématique du modèle de Park de la MASDE.....	38

# Liste des figures

---

## Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction

Figure III.1 : Modèle d'une batterie sous Matlab/Simulink.....	44
Figure III.2 : Résultats de simulation d'une batterie .....	45
Figure III.3 : Modèle d'un super condensateur sous Matlab/Simulink.....	45
Figure III.4 : Résultats de Simulation du super condensateur.....	46
Figure III.5 : Modèle d'une pile à combustible sous Matlab/Simulink.....	46
Figure III.6 : Résultats de simulation de la pile à combustible.....	47
Figure III.7 : Modèle d'une MASDE sous Matlab/Simulink.....	48
Figure III.5 : Résultats de Simulation de la MASDE essayent à vide.....	50
Figure III.9 : Résultats de Simulation de la MASDE avec un couple résistant.....	52
Figure III.10 : Modèle d'un système de traction d'un VE sous Matlab/Simulink .....	54
Figure III.11 : Résultats de Simulation d'un système de traction .....	56

## Chapitre IV : Commande Vectorielle d'une machine asynchrone double étoile

Figure IV.1 : Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE.....	59
Figure IV.2 : Bloc de défluxage.....	63
Figure IV.3 : schéma d'un régulateur de vitesse.....	64
Figure IV.4 : Modèle de commande d'une MASDE sous Matlab/Simulink.....	65
Figure IV.5 : Résultats de la commande indirect de la MASDE.....	67



# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le problème de pollution atmosphérique est le sujet d'actualité le plus sensible. L'une des conséquences graves à ce problème semble être le réchauffement climatique au gaz à effet de serre. Il se trouve que le CO<sub>2</sub> est le plus dangereux.

À l'origine de 17 % des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, les véhicules représentent le troisième secteur source d'émissions derrière la génération d'énergie et l'industrie. Un impact sur l'environnement perceptible autant à l'échelle planétaire que locale. La plupart des états ce qui incité à s'engager à limiter leurs émissions de gaz à effet de serre [18].

Afin de lutter contre le réchauffement climatique, dans un contexte de développement des parcs et des usages automobiles des pays émergents. Si la réduction des émissions par véhicule est une voie pour atteindre les objectifs fixés. La « promotion » du véhicule électrique constitue une solution sans doute plus efficace. Elle fait partie de notre quotidien. Propre, silencieuse et facile pour l'entretien.

Les véhicules électriques actuellement utilisent des machines spécifiques électriques pour sa traction et des batteries comme source d'énergie, et parmi ces machines on trouve, les machines à courant continu, les machines synchrones et plus particulièrement les machines synchrones à aimants permanents, à réluctance variable et les machines asynchrones à cage.

L'évolution technologique assiste la naissance d'une nouvelle machine spécifique qui est la machine asynchrone double étoile, fiable et robuste possédant d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et d'un rotor à cage d'écureuil. Elle permet de réduire les ondulations du couple électromagnétique, de limiter les harmoniques de courant, d'améliorer le facteur de puissance et de fonctionner à demi-régime.

Le présent travail a pour objectif d'étudier le fonctionnement d'une machine asynchrone double étoile dans une chaîne de traction d'un véhicule électrique, en appliquant la commande vectorielle par orientation de flux rotorique.

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur le véhicule électrique : l'histoire d'un véhicule électrique, son architecture ainsi les éléments de sa chaîne de traction,

## Introduction générale

---

son principe de son fonctionnement ainsi que les sources d'énergies nécessaires à son alimentation et sa motorisation sont détaillés.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la modélisation des éléments de la chaîne de traction à base d'une machine asynchrone double étoile avec une source d'alimentation hybride : on commence par la modélisation des sources d'énergies (la batterie, super condensateur et pile à combustible), ensuite la modélisation des convertisseurs statiques, ainsi que la modélisation de la MASDE en citant sa description, sa Constitution, son principe de fonctionnement, son modèle triphasé, son modèle biphasé basé sur la transformation de Park.

Le troisième chapitre, consiste à simuler les éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique (la batterie, super condensateur, pile à combustible, convertisseur statique et MASDE) sur l'environnement MATLAB/Simulink. .

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter la commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique d'une machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique, les résultats de simulation obtenus sont donnés également dans ce chapitre.

Nous allons terminer par une conclusion générale de l'étude et par l'exposition de quelques perspectives de recherche.

## I.1 Introduction

Le véhicule électrique prend une place importante dans le paysage automobile mondial grâce aux : progrès technologiques, politiques publiques incitatives, élargissement de l'offre et une bonne image auprès des automobilistes...

Le véhicule électrique (VE) est une invention très originale qui a su au fil des années se faire une place en tant qu'un moyen de transport. L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour sa motorisation n'est pas nouvelle : les premiers véhicules ont été propulsés en grande partie par des moteurs électriques. La réussite dans ce domaine, de motorisation électrique, proviendra d'un subtil mélange entre une vision scientifique de haut niveau et une maîtrise de la technologie. Dans cette combinatoire, l'électricité prend un rôle fondamental et contribuera à atteindre les nouveaux objectifs de l'automobile en termes de sécurité, de confort et d'environnement [18].

Ce premier chapitre a pour objectif de donner une vision globale sur les véhicules électriques et de présenter leurs différentes configurations, son architecture et les éléments de sa chaîne de traction. Enfin on a donné le principe de son fonctionnement ainsi ses enjeux liés aux développements économiques et écologiques actuels.

## I.2 Historique des véhicules électriques

Histoire du véhicule électrique commence en Europe au début du 19<sup>ème</sup> siècle, Après l'invention de la batterie primaire par VOLTA en 1800, et la démonstration du principe du moteur électrique par une barre de fer portant un courant électrique et un aimant en 1821 par FARADAY.

En 1831 ce dernier a découvert les lois de l'induction électromagnétique qui ont permis le développement et la démonstration des machines électriques essentielles pour le transport électrique, le premier véhicule électrique a été construit en 1834 à Brandon, en Grande Bretagne par THOMAS DAVENPORT. Ce véhicule fonctionnait à base d'une batterie non rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail [1].

Ensuite, en 1859, le français G. PLANTE inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable, et en 1869 GRAMME construisait le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval [2].

## Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

En 1873, apparition du premier véhicule à vapeur, qui atteignait une vitesse de 40 Km/h et qui pouvait transporter jusqu'à 12 personnes, pesait plus de deux tonnes [3].

Plus tard en 1874 David SALMONS construisait un véhicule électrique avec une batterie rechargeable [1]. En 1881, GUSTAVE réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire [2]. Après cinq ans en 1886 KARL BENZ fabriquait le premier véhicule thermique à essence, la Benz Patent Motorwagen [3].

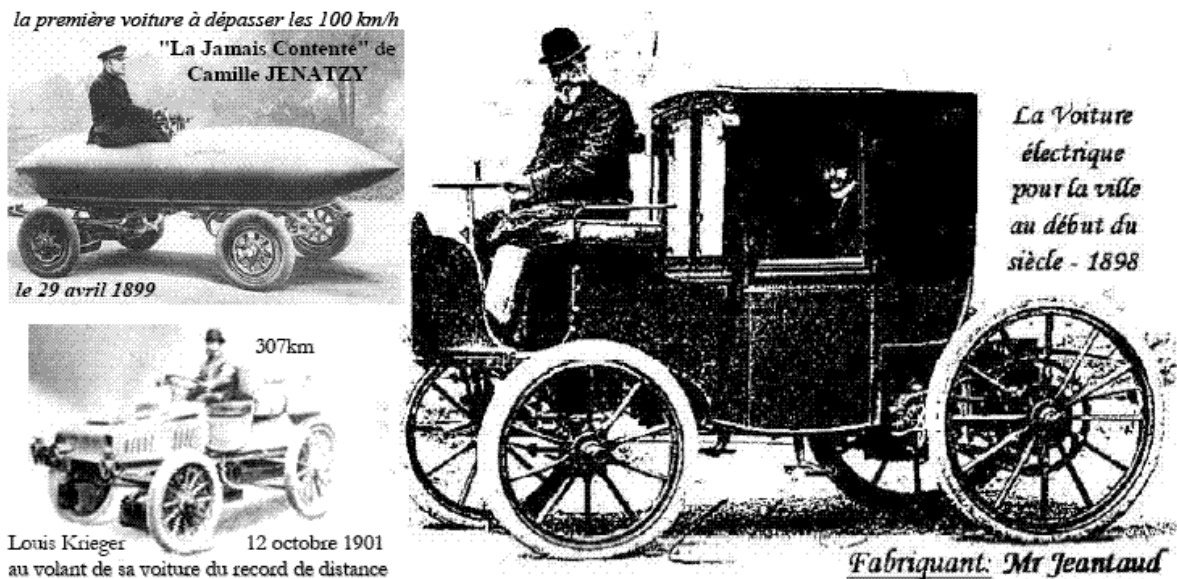


Figure I.1 : L'évolution des véhicules électriques en 19<sup>ème</sup> siècle [4]

Le début du 20<sup>ème</sup> siècle constitue l'âge d'or du véhicule électrique. En effet, c'est la première fois qu'un véhicule électrique a franchi la limite de 100 Km/h, le 29 avril 1899, le belge CAMILLE JENATZY conduisait sa voiture baptisée en forme d'obus.

Ce véhicule électrique qu'avaient deux moteurs entraînant directement les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50 KW, alimentés par quatre-vingt éléments de la batterie FULMEN pesant près de la moitié du poids total du véhicule de 1.5 tonne [5].

En 1910, après l'invention du moteur à explosion, la production des véhicules électriques atteignait son maximum car ces derniers disposaient encore de certains avantages par rapport aux véhicules thermiques [3].

Dans les années entre soixante et quatre-vingt-dix cause de la pollution atmosphérique et surtout des chocs pétroliers, de nombreux pays commençaient à s'intéresser aux véhicules électriques dans cette période [4].

# Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

---

En 1980, la production automobile s'était orientée vers des véhicules de plus en plus lourdes, plus puissantes et qui consommaient davantage. De ce fait l'accroissement du niveau de pollution a multiplié les revendications des écologistes, favorisant ainsi la mise en place de normes en vue de développement de plus en plus propres [3].

Aux Etats-Unis cela s'est concrétisé par l'adoption du règlement ZEV (Zero Emission Vehicle) en Californie en 1990. A l'époque ce règlement imposait aux constructeurs de réaliser au moins de 2% de leurs ventes locales avec des véhicules à zéro émission en 1998, en 2001 ce chiffre à passer à 5% et à 10% en 2003, et se chiffre augmente au fil des années. En 2017 les ventes de VE ont atteint 1,2 million d'unités dans le monde, soit une hausse de 60 % par rapport aux années précédentes. Tout ça Sous la pression de l'augmentation du prix du pétrole et du développement des préoccupations environnementales et, grâce aux derniers progrès techniques [3].

## I.3 Définition d'un VE

Le véhicule électrique est une solution judicieuse pour lutter contre la pollution, car il consomme directement de l'électricité, préalablement stockée dans des batteries d'accumulateurs et devront être chargées de façon régulière [6].

Il se compose de moteur électrique qui est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source en énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule ou inversement pour permettre la récupération d'énergie pendant le freinage [7].

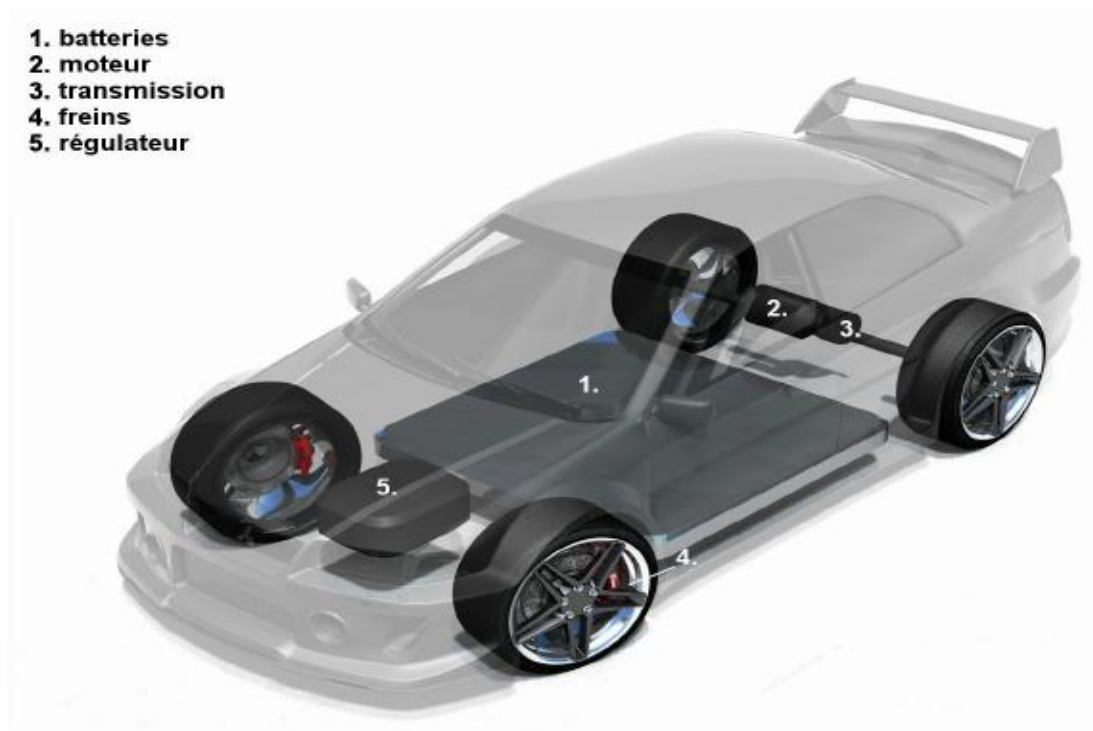


Figure I.2 Composants d'un véhicule électrique [7]

Les différents types des véhicules électriques sont [6] :

- Véhicules électriques à pile à combustible approvisionnée à l'hydrogène.
- véhicules électriques à énergies renouvelable ayant des panneaux solaires sur leurs toitures.
- véhicules électriques guidés, dont l'alimentation électrique est assurée par un réseau de caténares qui suivent leurs parcours.

## I.4 Architecture classique d'un VE

Le véhicule électrique est construit à base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. La capacité des moteurs électriques démarre à couple élevé et fonctionne sur une large plage de vitesse, rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesses [7].

Alors pour réduire la masse embarquée, les véhicules électriques sont conçus avec des réducteurs qui permettent au moteur électrique de tourner à grande vitesse, ces réducteurs agissent sur les moteurs pour réduire leur taille grâce à la réduction du couple demandé.

## Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution classique pour l'architecture des véhicules électriques.

En effet, la chaîne de traction classique d'un VE est composée d'un moteur électrique, source d'énergie, convertisseur, une transmission mécanique comprenant un différentiel et les roues [8]. (Figure I.3).

Les quatre principaux composants d'un véhicule électrique sont :

- Le moteur ;
- Convertisseur ;
- Source d'énergie.
- un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel).

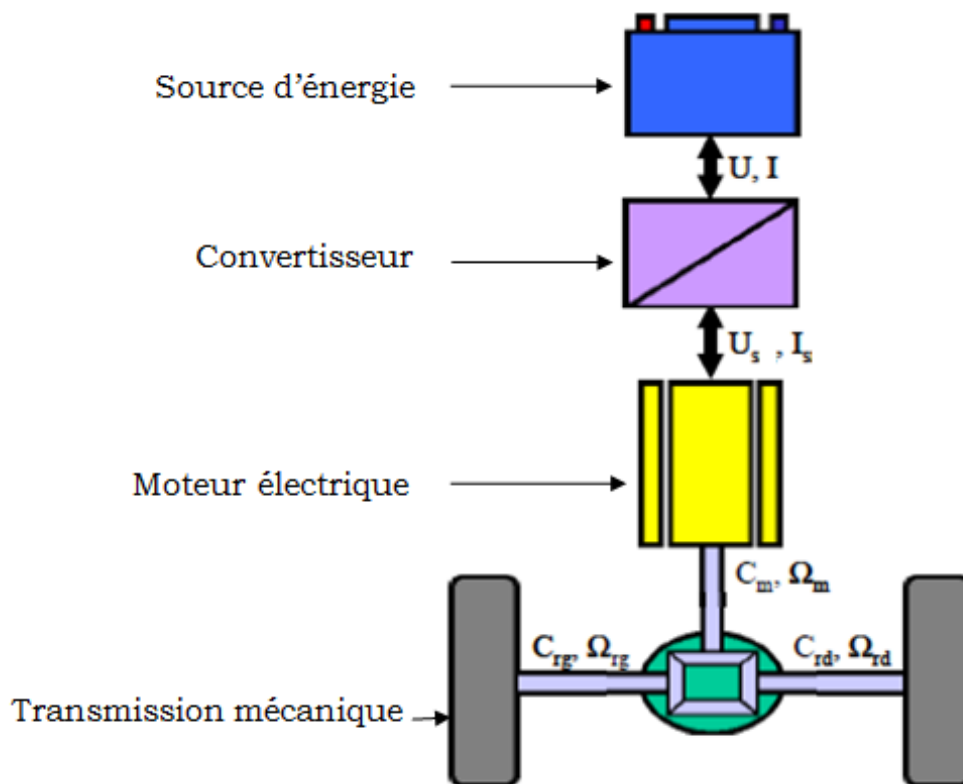


Figure I.3 Chaîne de traction d'un véhicule électrique [9]



## I.5 Classification d'un véhicule électrique

Les différentes architectures les plus utilisées par le constructeur automobile sont :

### I.5.1 Véhicule électrique à moteur roue

Le moteur roue est un ensemble qui comprend un moteur incorporé dans une roue, lequel est capable de propulser un véhicule. L'avantage principal de ce système est son encombrement réduit et le fait qu'il ne nécessite pas de transmission.

La chaîne de traction d'un véhicule électrique à moteur roue peut être encore simplifiée en utilisant un moteur pour chaque roue motrice.

Ainsi, le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur [10]. (Figure I.4).



Figure I.4 Roue englobant un moteur-roue [7]

### I.5.2 Véhicule électrique à Moteur fixé au châssis

Il existe plusieurs architectures des véhicules électriques à moteur fixé au châssis, où la puissance est transmise sur les roues par des cardans. L'avantage de cette configuration est que la suspension isole les roues de la masse du moteur et la conduite du véhicule est plus facile [7].



# Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

---

On peut distinguer les deux types les plus utilisés :

- Véhicule électrique à mono-moteur.
- Véhicule électrique à bi-moteur.

## I.5.2.1 Véhicule électrique à mono-moteur

L'architecture mono-moteur est représentée dans la figure I.5. Cette architecture est basée sur un moteur à courant continu, une batterie, un variateur série et un réducteur différentiel [11].

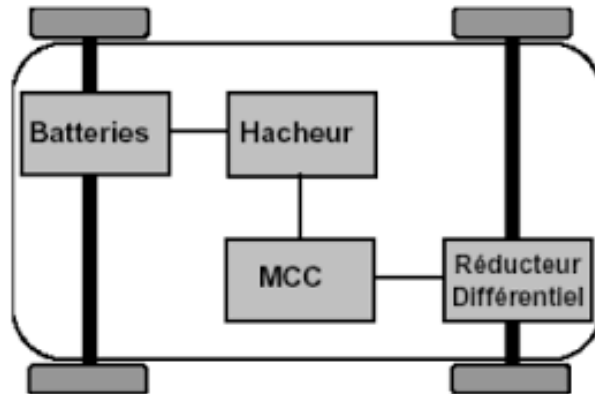


Figure I.5 : Architecture d'un véhicule électrique mono-moteur [12]

## I.5.2.2 Véhicule électrique à bi-moteur

L'architecture bi-moteur représentée dans la figure I.6. Cette architecture est basée sur une double chaîne de traction à l'aide de deux moteurs à courant continu, qui permet d'avoir plus de fiabilité côté moteur [11].

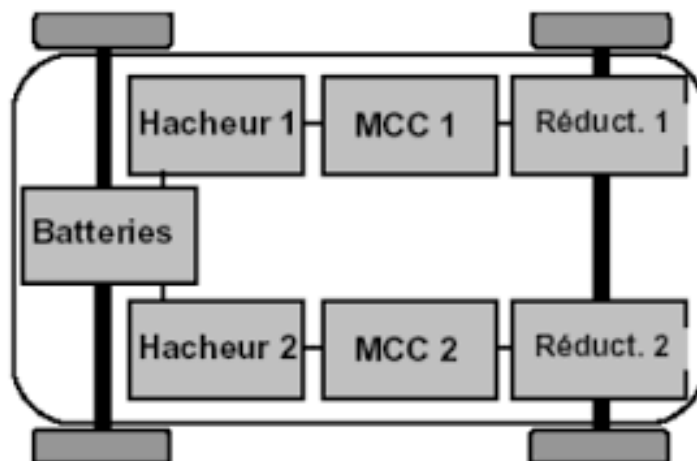


Figure I.6 : Architecture d'un véhicule électrique bi-moteur [12]

## I.6 Eléments de la chaîne de traction d'un VE

La chaîne de traction est un ensemble des organes traversés par le flux d'énergie, et qui assurent à un véhicule sa capacité de mouvement ainsi la transmission mécanique du mouvement. Elle est composée des roues, boîte de vitesse (BV), moteur convertissant l'énergie sortant du générateur embarqué en énergie mécanique, convertisseurs statiques et source d'énergie électrique embarquée.

### I.6.1 Sources d'énergies électriques embarquées

Un des problèmes majeurs des véhicules électrique est la source d'énergie. Dans cette partie, nous présentons de manière générale trois voies technologiques possibles d'alimentations embarquées. Il s'agit des batteries utilisées dans tous les véhicules électriques actuels, super-condensateurs et les piles à combustible, solutions d'avenir largement soutenues par les spécialistes des véhicules électriques.

#### I.6.1.1 Batteries

La batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes.

Il existe deux types de circuit dans la batterie donc deux formes de courant circulant : Le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie [13].

On dit que la batterie est un appareil qui transforme l'énergie chimique en électricité et constituée de plusieurs piles ou d'accumulateurs connectées en série ou en parallèle.

(FigureI.7).

Cette dernière doit être régulièrement rechargée. Il existe deux méthodes pour recharger la batterie [12] :

- Conduction : Le chargement se fait avec un système de branchement au réseau électrique.
- Induction : Le chargement se fait sans contact au réseau électrique.

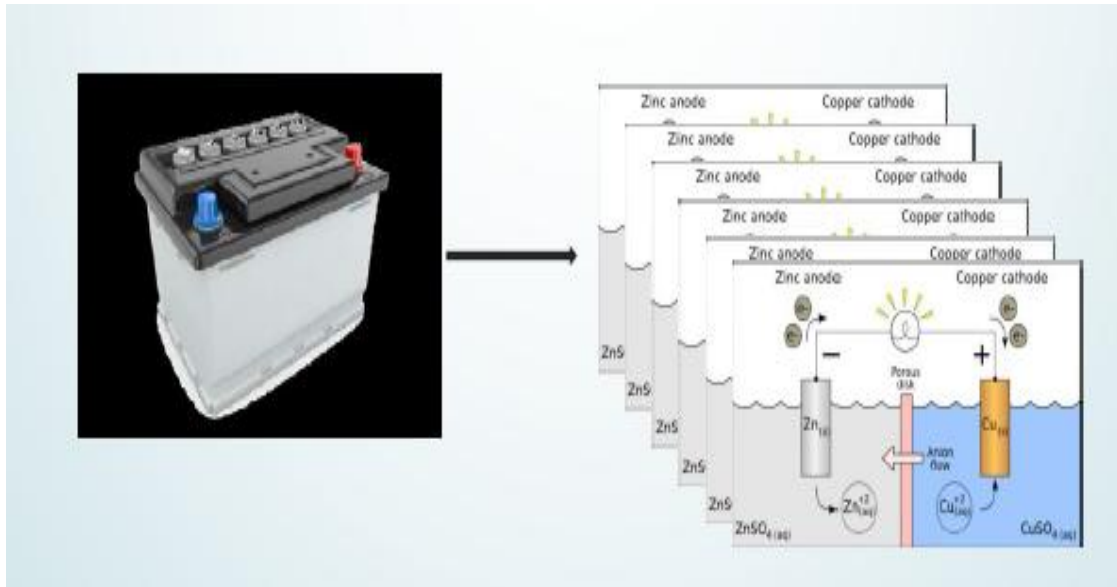


Figure I.7 : Batterie [13]

On peut distinguer plusieurs types de batteries [12], [14] :

- Batterie au plomb ;
- Batterie au nickel-cadmium ;
- Batterie au lithium-ion ;
- Batterie lithium-polymères ;
- Batterie sodium-chlorure de nickel ;
- Batterie zinc-air ;
- Batterie au nickel métal-hydrures ;
- Batterie Zebra.

## I.6.1.2 Super-condensateur

Le super-condensateur est un système électrochimique dont les caractéristiques sont situées entre celles des condensateurs électriques et celles des accumulateurs électrochimiques. Il stocke de l'énergie sous forme électrostatique. C'est un système de stockage d'énergie à faible densité, mais d'une densité de puissance élevée. Par conséquent, il est utilisé dans les phases transitoires pour fournir les pics de courant demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie [15][7].

Le stockage de l'électricité s'effectue par un simple déplacement de charges électroniques et ioniques. L'énergie est donc stockée dans la double couche électrique. Les électrodes sont à base de carbone activé et l'électrolyte doit être un conducteur ionique,

## Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

---

organique ou aqueux. Elles sont séparées par une membrane poreuse et inerte. Ces super condensateurs stockent les charges électriques grâce à d'une part la double couche électrochimique à l'interface entre le conducteur électronique (électrode) et le conducteur ionique (électrolyte) et d'autre part, à l'aptitude de certains matériaux à conduction électronique [7]. (Figure I.8)

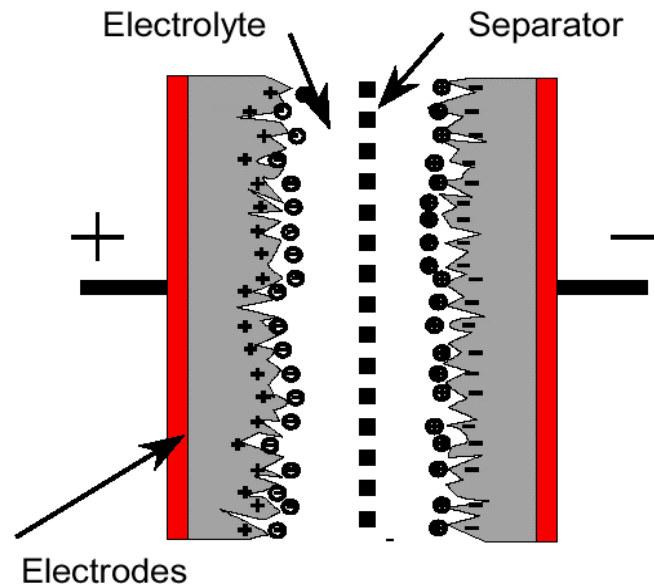


Figure I.8 : Super condensateur [7]

### I.6.1.3 Pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique qui convertit directement l'énergie chimique d'une réaction en énergie électrique tout en dégageant de la chaleur et de l'eau. Elle est composée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte en polymère [16]. (Figure I.9).

Actuellement, il existe différents types de pile à combustible qui peut être classés en deux grandes catégories suivant leur température de fonctionnement [16].

- Les piles fonctionnant à basse température.
- Les piles fonctionnant à haute température.

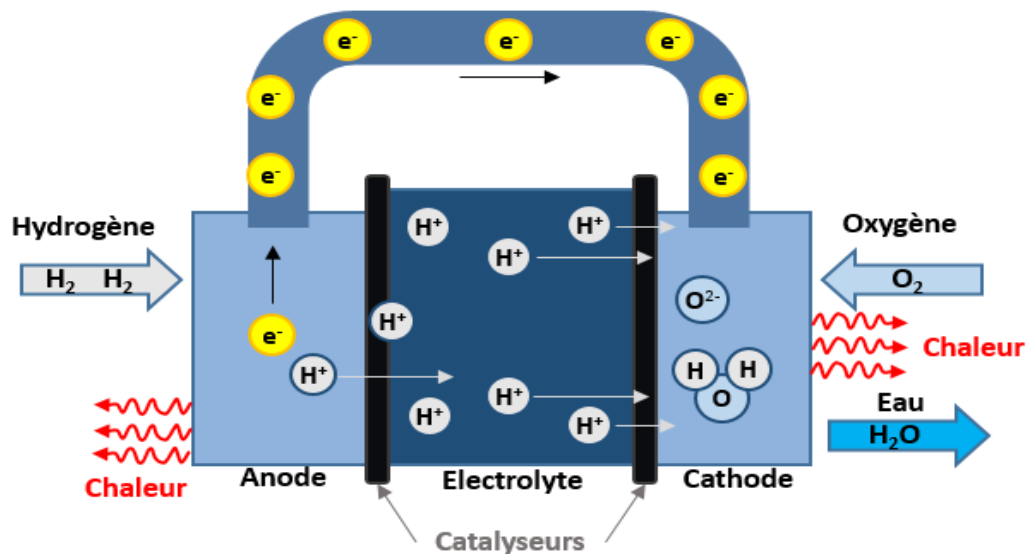


Figure I.9 : Pile à combustible [16]

## I.6.2 Convertisseurs statiques

Le convertisseur est une partie intégrante du moteur. Il existe trois grandes familles de convertisseurs électroniques sont utilisées aujourd'hui pour l'électronique de puissance des véhicules pour convertir l'énergie [12], [9].

De ce fait on pourra trouver à bord des véhicules :

- Des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC/DC), c'est les redresseurs ;
- Des convertisseurs de courant continu en courant continu (DC/DC), c'est les hacheurs ;
- Des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC/AC), c'est les onduleurs.

## I.6.3 Moteurs électriques

Il existe trois grandes familles de moteurs électriques pour les véhicules électriques qui sont :

- moteurs à courant continu ;
- moteurs synchrones ;
- moteurs asynchrones.

## I.6.3.1 Moteurs à courant continu (MCC)

Les moteurs à courant continu sont des machines électriques qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. L'avantage de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se confient facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse.

Les moteurs à courant continu sont la solution la plus économique grâce à son convertisseur de type hacheur à deux interrupteurs. Cette technologie est retenue par de nombreux constructeurs automobiles pour la politique commerciale des véhicules électriques de première génération [17].

## I.6.3.2 Moteur synchrone (MS)

Le moteur synchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation et la vitesse du champ tournant sont égales. Il est constitué d'un stator comportant des enroulements d'induit et d'un rotor qui porte un inducteur. L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée au bout d'arbre [12].

On peut distinguer trois types de moteur synchrone :

- Moteur synchrone à rotor bobiné ;
- Moteur synchrone à aimants permanents ;
- Moteur synchrone à reluctance variable.

## I.6.3.3 Moteur asynchrones (MAS)

Le moteur asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation et la vitesse du champ tournant sont différentes. La vitesse de rotation est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ tournant. Le MAS comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements [14].

Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est mobile : il est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence.

On peut distinguer trois types de moteur asynchrone

- Moteur asynchrone à cage d'écureuil ;
- Moteur asynchrone à rotor bobiné ;
- Moteur asynchrone à double alimentation ;
- Moteur asynchrone à double étoile.

## I.7 Principe de fonctionnement d'un véhicule électrique

Dans le véhicule électrique, la batterie stocke l'électricité. Elle est connectée au moteur électrique par l'intermédiaire d'un régulateur et d'un convertisseur. Le régulateur sert à régler l'intensité du courant qui alimente le moteur [12].

Son fonctionnement est assez simple : Lorsque le conducteur du véhicule appuie sur la pédale de l'accélérateur, la batterie crée un courant continu qui va se convertir en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur statique. Le point fort du véhicule électrique est la chaîne de transmission électromécanique [12].

En effet ; un véhicule a besoin d'un couple élevé à basses vitesses afin de pouvoir accélérer et d'un couple moins important à des vitesses de croisière. Ces diversités sont celles d'un moteur électrique d'un point de vue mécanique donc, un véhicule électrique est plus simple qu'un véhicule à moteur thermique : pas d'embrayage pas de boîte de vitesses [12].

## I.8 Enjeux liés au développement d'un VE

Le véhicule électrique (VE) semble pouvoir répondre à une partie des enjeux environnementaux, économiques, industriels et sociaux.

### I.8.1 Véhicule électrique c'est du propre

Le VE est souvent qualifié de « propre ». Rouler en véhicule électrique, c'est choisir un moyen de déplacement qui n'émet presque pas de CO<sub>2</sub> [18]. Raison pour laquelle les VE pourront être la solution idéale pour réduire les gaz par effet de serre afin de réduire la pollution atmosphérique locale au fil des années. En plus le VE est un véhicule à faible bruit acoustique [19].

La figure I.10 illustre de manière synthétique le poids des différentes externalités met lors de la circulation des véhicules au fil des années.

## Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

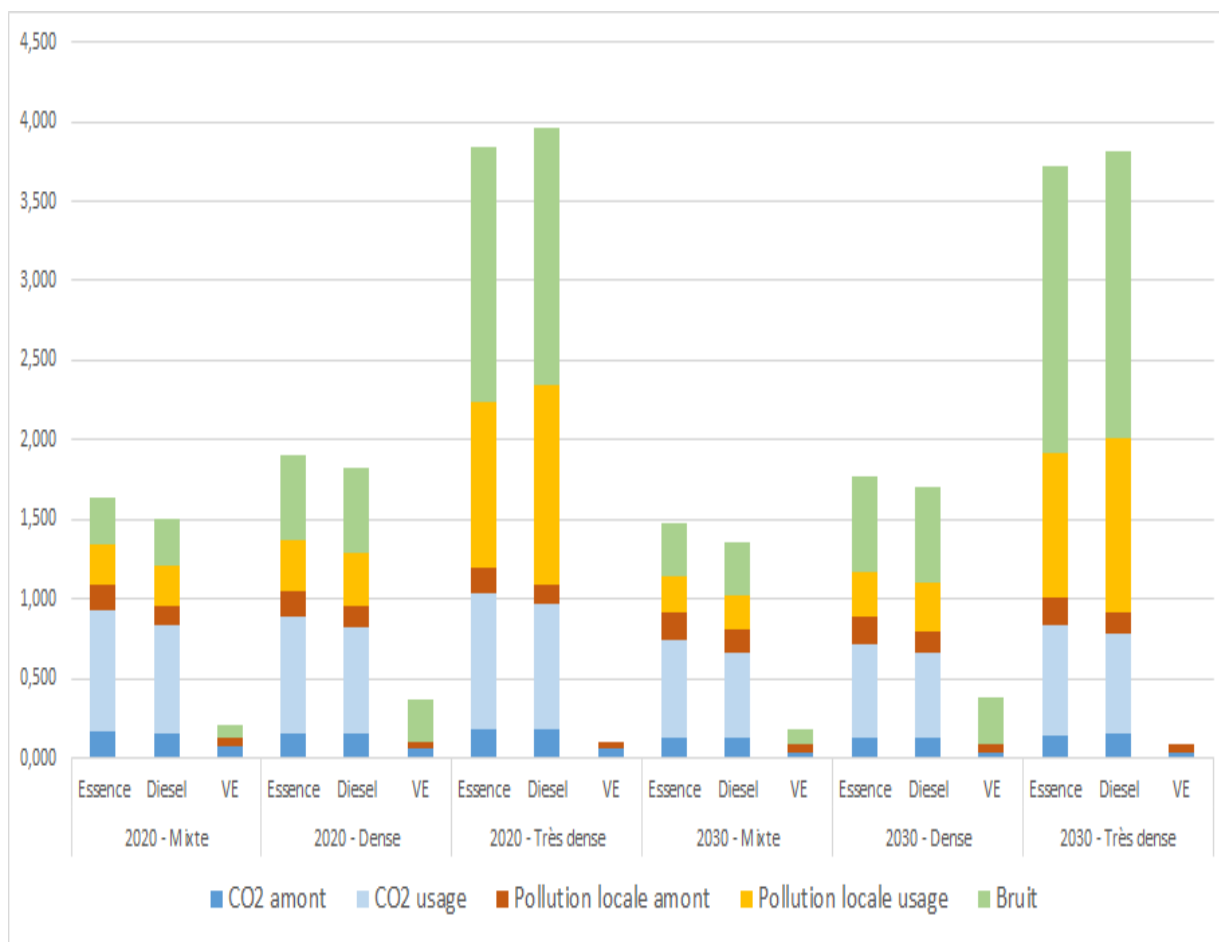


Figure I.10 : Externalités des VT / VE selon les milieux et l'énergie utilisée gCO<sub>2</sub>/kWh dans les années prochaines [19]

### I.8.2 Evolution des coûts de la batterie d'un VE

Le coût des batteries est décroissant depuis plusieurs années. La hausse programmée des volumes laisse espérer une poursuite de la baisse des prix mieux encore, la nouvelle technologie dite de la batterie solide pourrait révolutionner. Le VE dans les dix prochaines années. Pour un coût largement réduit, l'autonomie serait plus que doublée et la vitesse de charge limitée à quelques minutes. La perspective de disposer d'un véhicule électrique plus pratique et plus compétitive que n'importe quel autre véhicule [18].

La figure I.11 illustre de manière synthétique les coûts des batteries par kW/h au fil des années.



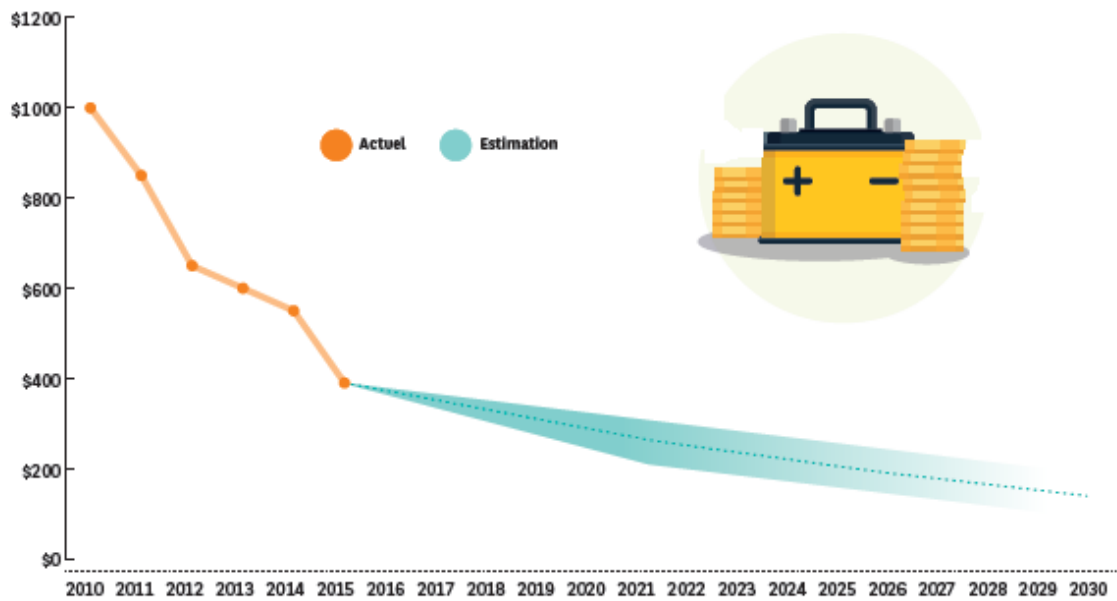


Figure I.11 : Coût des batteries par kW/h au fil des années [18]

### I.8.3 Bilan économique comparé du VE

Le Bureau européen des associations de consommateurs conclut qu'entre une Opel Astra à essence et une Nissan LEAF 100 % électrique, le coût total de cette dernière est 8 % plus important en 2015. Cette différence sera ramenée à 4 % en 2020 puis à 1,5 % en 2025, pour ne plus représenter que 0,5 % à l'horizon 2030.

L'évolution des cours du pétrole et de sa fiscalité, et la baisse du prix des batteries, qui comptent pour la moitié du prix de VE, détermineront, le rythme exact de la convergence [18].

La figure I.12 illustre La comparaison du coût total des différentes solutions énergétiques au fil des années.

# Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

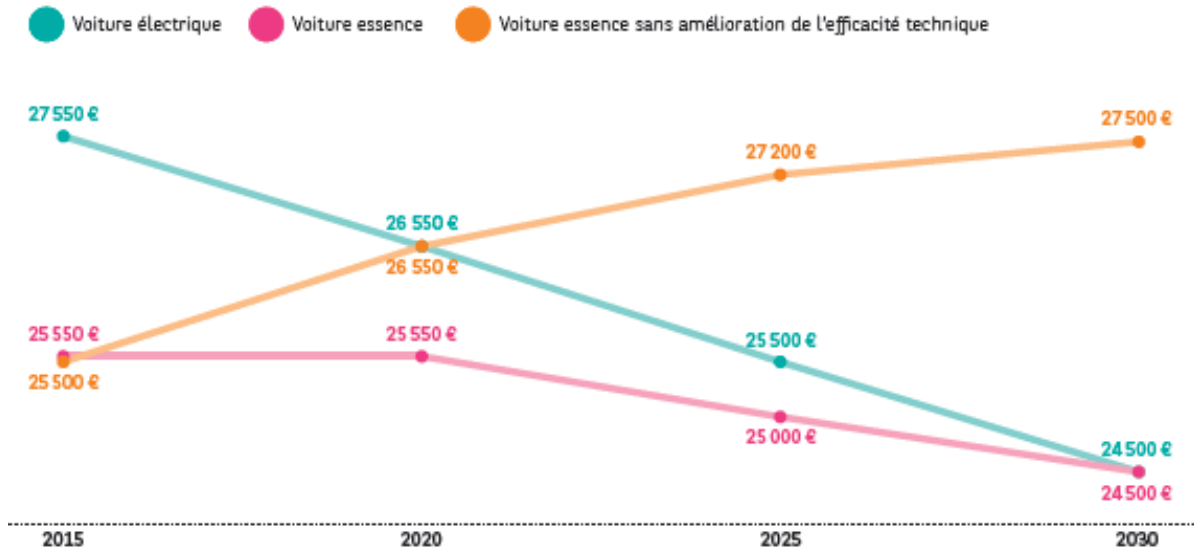


Figure I.12 Évaluation du coût total des différents véhicules [18]

## I.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons d'abord montré pourquoi le véhicule électrique était redevenu une problématique d'actualité, puis nous avons détaillés les différentes structures de VE en montrant leurs intérêts. Ensuite, on a présenté les organes de traction électrique : sources d'énergie électrique embarquée, convertisseurs électrique (DC/DC, DC/AC et AC/DC), moteurs électrique (MCC, MS et MAS). Ainsi son principe de fonctionnement. Et les enjeux liées au son développement.

La modélisation d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique à base d'une machine asynchrone à double étoile (MASDE) avec une source d'alimentation hybride fait l'objet du chapitre suivant.

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.1 Introduction

La modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique fait appel à des équations en général très complexes. En effet, la géométrie propre des éléments de la chaîne de traction rend son modèle difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices permet de contourner cette difficulté.

Des nouvelles constructions interviennent dans la traction des véhicules électriques sont des machines asynchrones avec doubles enroulements statoriques, sont développées et étudiées ces dernières années, ce type de machine est appelée machine asynchrone double étoile, la modélisation de cette dernière et la description de sa structure générale sont basées sur la transformation de Park.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation des éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, en commençant par la modélisation des sources d'énergies qui sont : la batterie, super condensateur et la pile à combustible, ensuite la modélisation du convertisseur statique (l'onduleur), on termine par la modélisation de la machine utilisée(MASDE).

Dans notre cas, la topologie de la chaîne de traction d'un véhicule électrique est présentée par la figure (II.1).

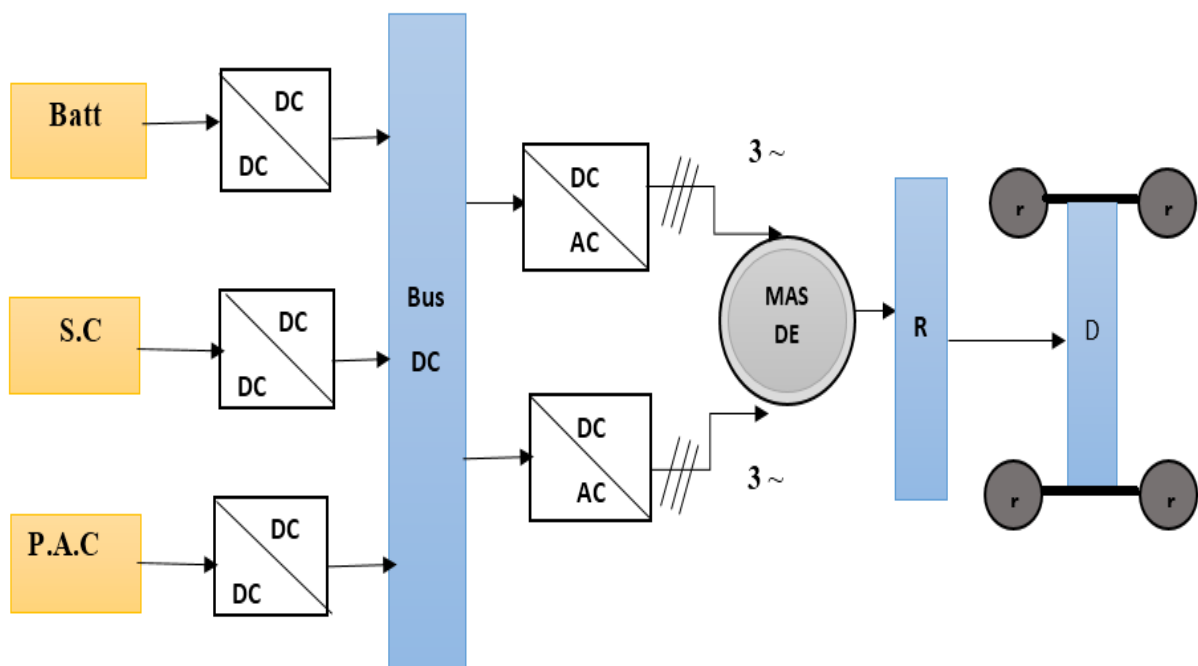


Figure II.1 : Topologie de la chaîne de traction d'un véhicule électrique

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.2 Modélisation des sources d'énergies électriques embarquées

#### II.2.1 Modélisation d'une Batterie

Il existe plusieurs modèles de batterie. Plus on prend en considération les phénomènes électrochimiques plus le modèle est complexe.

##### II.2.1.1 Choix de la batterie

Au début de 2005 les batteries au plomb sont les plus utilisées dans les véhicules électriques à quatre roues et à deux roues, qui sont progressivement complétés par de nouvelles technologies [12].

La batterie au plomb présente l'avantage non négligeable de présenter le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connus. Malgré son grand âge, il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle chimique ou électrique permettant de reproduire assez précisément et dans divers cas de figure son fonctionnement. Les seuls modèles disponibles sont soit assez imprécis, soit seulement utilisables dans certaines conditions d'utilisation bien précises.  $PbO_2$  est la cathode et  $Pb$  est l'anode, tant en charge qu'en décharge [13].

Afin d'obtenir la tension désirée aux bornes d'un élément, on connecte plusieurs cellules en série à l'intérieur du module ; par contre, si l'on désire augmenter la capacité et le courant, il faut connecter ces cellules en parallèle [7].

##### II.2.1.2 Modèle de la batterie

La batterie au plomb du modèle de CIEMAT est décrite par seulement deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres : tension à vide  $E_{batt}$ , sa résistance interne  $R_{batt}$  et son courant [13].

$$V_{batt} = n_b E_{batt} + n_{batt} R_{batt} I_{batt} \quad (II.1)$$

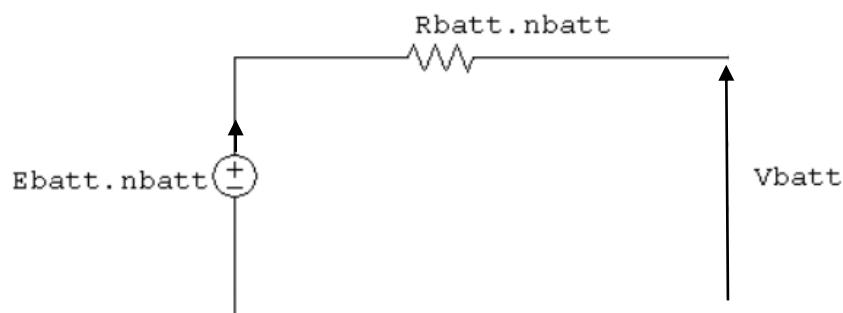


Figure II.2 : Schéma équivalent de la batterie

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.2.1.3 Modèle de la capacité

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie  $C_{batt}$  que peut restituer la batterie, en fonction du courant moyen de décharge  $\overline{I_{batt}}$ . Son expression est établie à partir du courant  $I_{10}$  correspondant au régime de fonctionnement  $C_{10}$  [13].

$$\frac{C_{batt}}{C_{10}} = \frac{1.67}{1+0.67 \cdot \left(\frac{I_{batt}}{I_{10}}\right)} \cdot (1 + 0.005 \cdot \Delta T) \quad (II.2)$$

Avec :  $\Delta T$  représente le réchauffement de l'accumulateur par rapport une température ambiante de 25°C.

La capacité  $C_{batt}$  sert à déterminer l'état de charge (EDC) de la batterie. Cette dernière sera formulée en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie  $Q_d$ .

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \quad (II.3)$$

Dont :  $Q_d$  est calculé par la fonction suivante :  $Q_d = I_{batt} \cdot t$

Avec :  $t$  est le temps la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{batt}$ .

### II.2.1.4 Tension de la batterie en régime de charge

L'équation de la tension en régime de charge est comme suit.

$$V_{batt\_char} = n_b [2 + 0.16 EDC] + n_b \cdot \frac{|I_{batt}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1+|I_{batt}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (II.4)$$

### II.2.1.5 Tension de la batterie en régime de décharge

L'équation de la tension en régime de décharge est comme suit :

$$V_{batt\ déchar} = n_{batt} \cdot [2 + 0.16 EDC] + n_{batt} \cdot \frac{|I_{batt}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.8}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.5}} + 0.02 \right) \cdot (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (II.5)$$

### II.2.2 Modélisation d'un super condensateur

Afin de remédier aux problèmes de surdimensionnement des batteries dans le VE, les super condensateurs présentent des propriétés très intéressantes en termes de stockage d'énergie. Du fait de leur faible densité d'énergie et leur densité de puissance importante, le SC sera sollicité lors des phases transitoires pour fournir les pics de puissances demandés [20].

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.2.2.1 modèle de super condensateur

Les constructeurs utilisent la similitude entre le comportement de super condensateur et celui de condensateur électrolytique. Pour cela un SC est caractérisé par une résistance série  $R_{sc}$  et une capacité de stockage  $C_{sc}$  [07].

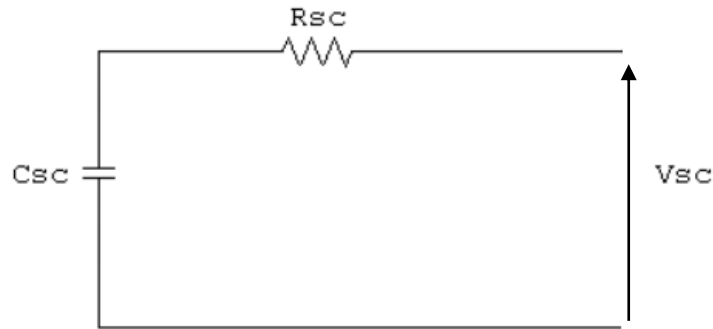


Figure II.3 : Schéma équivalente de super condensateur

La tension aux bornes d'un super condensateur  $V_{sc}$  est donnée en fonction de son courant  $I_{sc}$  et l'énergie contenue dans le SC  $E_{sc}$  par :

$$V_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) = E_{sc} - R_{sc}I_{sc} \quad (\text{II.6})$$

La puissance  $P_{sc}$  est définie par :

$$P_{sc} = V_{sc}I_{sc} \quad (\text{II.7})$$

Les Conventions appliquées sont :

$P_{sc} > 0$  En traction (décharge du super condensateur).

$P_{sc} < 0$  En freinage (charge du super condensateur).

### II.2.2.2 Tension et énergie à vide

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide SC  $V_c$  est calculée de la manière suivante :

$$V_c = V_c(0) - \frac{1}{c} \int_0^t I_{sc}(u) du \quad (\text{II.8})$$

L'énergie contenue dans le SC  $E_{sc}$  est en fonction de sa tension à vide  $V_0$  et sa capacité  $C_{sc}$ .

De ce fait, l'énergie maximale  $E_{scmax}$  est obtenue pour la tension à vide maximale  $E_{scmax}$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

$$E_{sc}(V_c) = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot V_0^2 \quad (\text{II.9})$$

### II.2.2.3 Tension et énergie en charge

Par définition, l'état de charge SOC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le super condensateur et l'énergie maximale admissible [20] :

$$SOC = \frac{E_{sc}(t)}{E_{scmax}} \quad (\text{II.10})$$

### II.2.2.4 Tension et capacité de Pack

Pour satisfaire aux besoins en puissance et en énergie d'une application donnée, un assemblage de plusieurs super condensateurs est utilisé [20].

Lorsque  $N_{sc}$  super condensateurs sont connectés en série, la tension du pack  $U_{sc}$  et la capacité équivalente  $C_{sc}^{eq}$  sont données

$$U_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) = V_{sc}(E_{sc}, I_{sc}) N_{sc} \quad (\text{II.11})$$

$$C_{sc}^{eq} = \frac{C_{sc}}{N} \quad (\text{II.12})$$

### II.2.3 Modélisation d'une pile à combustible type PEM

La production d'énergie propre en quantité suffisante pour alimenter une motorisation électrique peut se faire grâce à la pile à combustible.

#### II.2.3.1 Modèle d'une pile à combustible

Le modèle de la pile à combustible de type PEMFC est schématisé dans la figure (II.3)

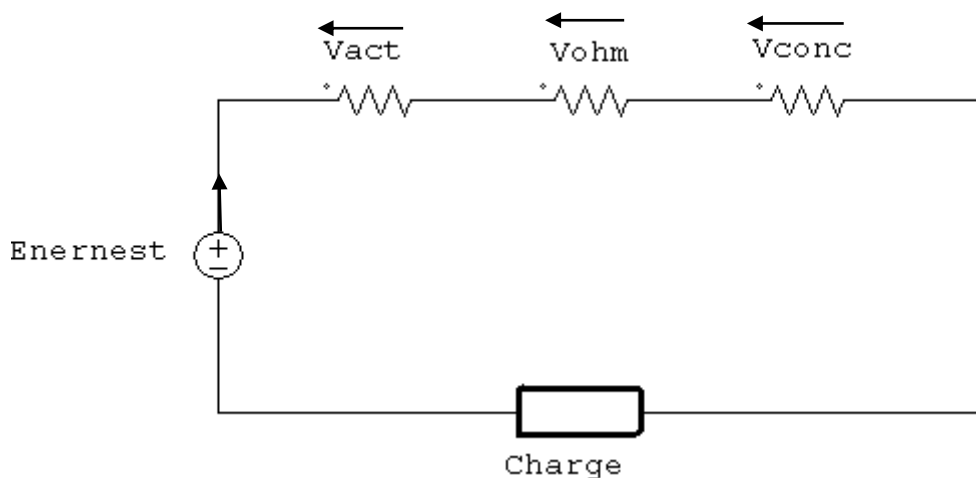


Figure II.4 : Schéma équivalent de pile à combustible

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

La tension aux bornes d'une pile à combustible est donnée par l'équation suivante :

$$U_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (II.13)$$

Avec :  $V_{act}$ : Polarisation d'activation.

$V_{ohm}$ : Polarisation ohmique.

$V_{conc}$  : Polarisation de concentration.

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3}(T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \cdot [\ln(P_{H_2}^*) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}^*)] \quad (II.14)$$

Avec : T : Température opératoire absolue de la pile (K) ;

$P_{H_2}^*$ : Pressions partielles à l'interface de l'hydrogène (atm) ;

$P_{O_2}^*$  : Pressions partielles à l'interface de l'oxygène (atm).

### II.2.3.2 Polarisation d'activation

Les pertes d'activations sont dues au démarrage des réactions chimiques, ils sont essentiellement dus aux réactions cathodiques [10], [20].

La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante :

$$V_{act} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot T + \varepsilon_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}^*) + \varepsilon_4 \cdot T \cdot \ln(I_{PAC}) \quad (II.15)$$

Avec :  $I_{PAC}$ : Courant de fonctionnement de la pile ;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ : sont des coefficients paramétriques appropriés à chaque modèle physique de la pile à combustible ;

Le terme  $\frac{181.6}{(\delta_{H_2O}/SO_3^- - 0.0634)}$  représente la résistance spécifique de la membrane ( $\Omega \cdot cm$ ).

$\delta_{H_2O}/SO_3^-$ : Est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22 ;

A : Est la surface active de la pile ( $cm^2$ )



## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

Donc l'expression de la polarisation est :

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[ \frac{181.6 \cdot \left[ 1 + 0.03 \cdot \frac{I_{PAC}}{A} + 0.062 \cdot \left( \frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \delta_{H_2O/SO_3^-} - 3 \cdot \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right) \cdot \exp \left[ 4.18 \cdot \left( \frac{T-303}{T} \right) \right] \right]} \cdot l + A \cdot R_C \right] \quad (II.16)$$

### II.2.3.3 Polarisation de concentration

Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction. Ces pertes sont données par la réaction suivante [10], [20] :

$$V_{conc} = -B \left( 1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (II.17)$$

Avec :  $B$  est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement ;

$J$  Est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm<sup>2</sup>) ;

$J_{max}$  Est la densité de courant maximale.

Par conséquent, la tension ( $E_S$ ) de ( $n$ ) piles unitaire reliées en série formant un assemblage est donné par :

$$E_S = n \cdot E_{PAC} \quad (II.18)$$

On remplace les expressions des parties dans l'équation (II.13) et on obtient le potentiel réel global de la pile à combustible :

$$U_{PAC} = 0.2817 - 0.8510 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3081 \cdot T \left[ \ln \left( \frac{3}{4} P_{anode} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{2} P_{cath} \right) \right] + \left[ 2.86 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4} \ln(A) + 4.310 \cdot 10^{-5} \cdot \ln \left( \frac{0.76 \cdot P_{anode}}{1.091 \times 10^6 \times \exp \left( \frac{77}{T} \right)} \right) \right] T + 7.6 \cdot 10^{-5} \cdot \ln \left( \frac{0.5 P_{cath}}{5.08 \times 10^6 \times \exp \left( -\frac{498}{T} \right)} \right) - 1.93 \times 10^{-4} \cdot T \cdot \ln(I_{PAC}) - I_{PAC} \left[ \frac{1.816 \left[ 1 + 0.03(I_{PAC}) + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{A \left[ \delta_{H_2O/SO_3^-} - 0.0643 - 3 \frac{I_{PAC}}{A} \right] \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T-303}{T} \right) \right]} \right] l + R_C \right] \quad (II.19)$$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.3 Modélisation du convertisseur statique

Dans un véhicule électrique équipé d'un moteur à courant alternatif on utilise un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative. Le contrôle de la vitesse et du couple de la MASDE se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable [21].

#### II.3.1 Modèle d'un onduleur

Chaque étoile de la MASDE est connectée à un onduleur triphasé à commutations commandées. Ce dernier est constitué de trois branches ou chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante [21], [07] :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{L'interrupteur est fermé et } K_i \text{ conduit } \bar{K}_i \text{ bloqué} \\ 0 & \text{L'interrupteur est fermé et } K_i \text{ bloqué } \bar{K}_i \text{ conduit} \end{cases}$$

Avec :  $f_i + \bar{f}_i = 1$

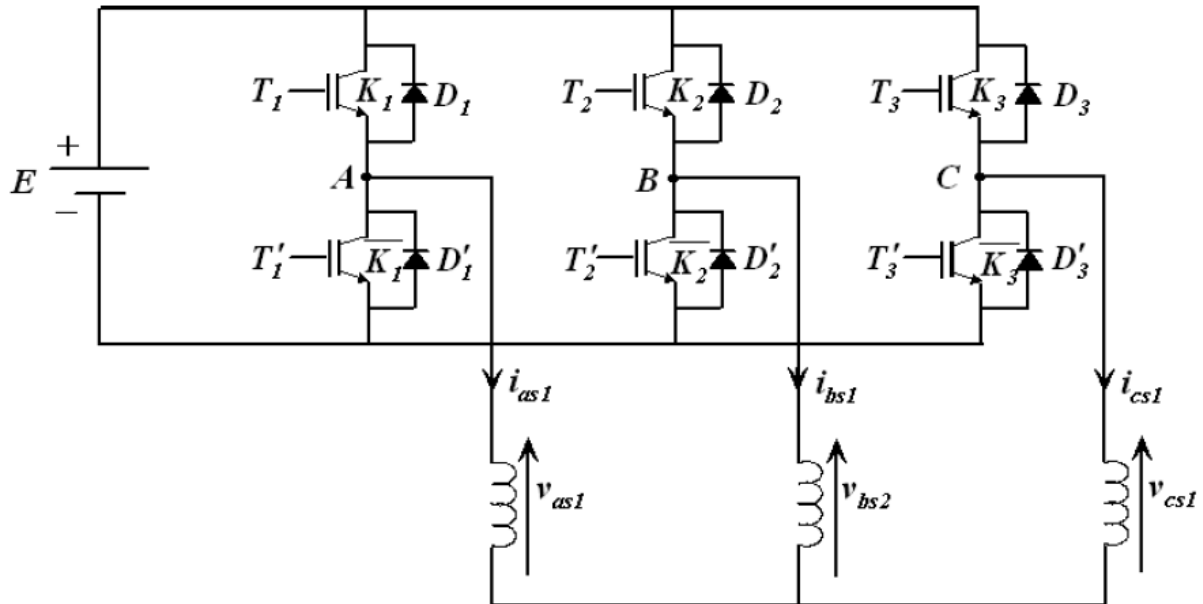


Figure II.5 : Schéma d'un onduleur de tension triphasée

#### II.3.2 Les tensions composées

$$\begin{cases} V_{as} = V_{as1} - V_{bs1} = E(f_1 - f_2) \\ V_{bs} = V_{bs1} - V_{cs1} = E(f_2 - f_3) \\ V_{cs} = V_{cs1} - V_{as1} = E(f_3 - f_1) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

### II.3.3 Les tensions simples

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Avec :  $V_{as1} + V_{bs1} + V_{cs1} = 0$

Pour l'étoile 2:

$$\begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :  $V_{as2} + V_{bs2} + V_{cs2} = 0$

## II.4 Convertisseur de puissance (Hacheur élévateur-abaisseur)

Dans un véhicule électrique les hacheurs sont indispensables ont pour rôles d'adapter les niveaux de tension des sources à la valeur du bus continu nécessaire pour alimenter l'onduleur. C'est le fonctionnement élévateur du convertisseur.

Par ailleurs ils assurent la récupération de l'énergie en régime de freinage. C'est le fonctionnement abaisseur, cette énergie récupérée servira à recharger les sources [7].

Le but de L'utilisation ce dernier est de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

## II.5 Modélisation de la machine utilisée

Dans notre étude nous avons choisi la machine asynchrone à double étoile

### II.5.1 Description de la machine asynchrone à double étoile

#### II.5.1.1 Définition

La machine asynchrone à double étoile est une machine multi-phase qui comporte deux bobinages statoriques et un bobinage rotorique. Ces deux bobinages statoriques appelé les étoiles statoriques sont décalées entre elle d'un angle  $\alpha$ .

Chaque étoile est composée de trois enroulements identiques. Leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal à  $2\pi/3$  dans l'espace [22].

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.5.1.2 Constitution

La machine asynchrone à double étoile est constituée essentiellement de deux armatures :

- Une armature fixe appelée stator, comporte deux étoiles. Chaque étoile est composée de trois enroulements identiques à paires de pôles.

Leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique égal  $2\pi/3$ . Ils sont logés dans des encoches du circuit magnétique.

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé équilibré de courants entraînant la création d'un champ tournant le long de l'entrefer. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de paires de pôles [23].

- Une armature mobile autour de l'axe de symétrie de la machine appelée rotor, il est constituée de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de paires pôles identique à celui du stator.

La structure électrique du rotor est de type cage d'écureuil (barre conductrice en aluminium aux tôles ferromagnétiques). Ce choix permet d'obtenir des machines robuste, facile d'employer et nécessitant un entretien limité [23].



Figure. II.6 : Machine asynchrone double étoile [24]

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

### II.5.1.3 Principe de fonctionnement

Les courants statoriques de la machine asynchrone double étoile créent un champ magnétique tournant dans les deux étoiles : l'étoile 1 alimenté par des courants triphasés et l'étoile 2 alimenté par les mêmes courants triphasés mais décalé d'un angle  $\alpha = \pi/6$ .

La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme  $\omega_s$ .

La vitesse de synchronisme est donnée par :

$$\omega_s = \frac{f_s}{p} \text{ rad/s}$$

Ces deux champs tournant produisent par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor.

Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse inférieure à celle du synchronisme ( $\omega_r < \omega_s$ )[24].

Les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotorique se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse de glissement qui est donnée par :  $\omega_g = \omega_s - \omega_r$

On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement

$$\text{par : } g = \frac{\omega_g}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

### II.5.1.4 Applications de la Machine asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile (MASDE) est utilisée beaucoup plus dans les applications de puissances élevées [25].

Parmi ces applications on cite

- Les pompes ;
- Les ventilateurs ;
- Les compresseurs ;
- Les moulins des compresseurs ;
- Les moulins du ciment.

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

### II.5.1.5 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone double étoile

#### II.5.1.5.1 Avantages

La MASDE présente plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines conventionnelles multi-phases [26] :

- Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques ;
- Segmentation de puissance ;
- Amélioration de la fiabilité ;
- Amélioration du facteur de puissance.

#### II.5.1.5.2 Inconvénients

Cependant, la MASDE présente des inconvénients comme tout autre équipement [26] :

- Coût très élevés ;
- La multiplication du nombre des semi-conducteurs avec la structure dynamique est fortement non linéaire ;
- L'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux.

### II.5.2 Représentation de la machine asynchrone double étoile

La représentation schématique de la machine asynchrone double étoile donne la position des axes d'enroulement des neuf phases constituant la machine Six phases pour le stator et trois phases pour le rotor [25].

On notera par l'indice  $s1$  pour les grandeurs relatives à la première étoile et par l'indice  $s2$  pour celles relatives à la deuxième étoile.

Les phases de la première étoile  $as1$ ,  $bs1$ ,  $cs1$  et les phases de la deuxième étoile prennent  $as2$ ,  $bs2$ ,  $cs2$ , les phases rotorique sont notées par  $ar$ ,  $br$ ,  $cr$ . L'angle de décalage entre les deux étoiles est  $\alpha$ .  $\theta_r$  exprime la position du rotor par rapport à l'étoile 1 et  $(\theta_r - \alpha)$  la position du rotor par rapport à l'étoile 2.

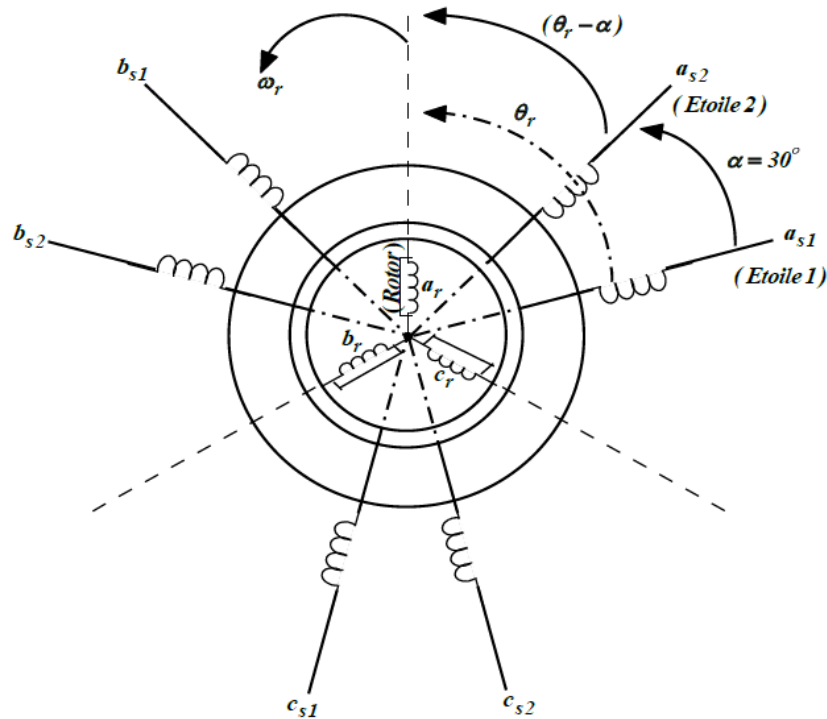


Figure. II.7 : Représentation des enroulements de la MASDE [26]

### II.5.3 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone double étoile avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [27].

Pour notre étude, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La Machine est de construction symétrique ;
- Le circuit magnétique est non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaire des courants ;
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases sont à répartition spatiale sinusoïdale ;
- Les pertes par hystérésis et le courant de Foucault sont négligeables ;
- L'inductance de fuite mutuelle commune aux deux étoiles est négligeable ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on n' néglige l'effet de peau.

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.5.4 Modèle triphasé de la machine asynchrone double étoile

Le comportement de la machine asynchrone double étoile est décrit par quatre équations :

- Equations électriques ;
- Equations magnétiques ;
- Equations mécaniques ;
- Expression du couple électromagnétique.

#### II.5.4.1 Equations électriques

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque phase, les équations de tension des six phases pour le stator et trois phases pour le rotor, s'écrivent pour le stator avec l'indice "s" et "r" pour le rotor.

Les équations de la tension des deux stators s'écrivent comme suit :

Pour l'étoile 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{as1} = R_{s1} i_{as1} + \frac{d\varphi_{as1}}{dt} \\ v_{bs1} = R_{s1} i_{bs1} + \frac{d\varphi_{bs1}}{dt} \\ v_{cs1} = R_{s1} i_{cs1} + \frac{d\varphi_{cs1}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.23})$$

Pour l'étoile 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{as2} = R_{s2} i_{as2} + \frac{d\varphi_{as2}}{dt} \\ v_{bs2} = R_{s2} i_{bs2} + \frac{d\varphi_{bs2}}{dt} \\ v_{cs2} = R_{s2} i_{cs2} + \frac{d\varphi_{cs2}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

Les équations de la tension de rotor :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.25})$$



## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

On peut les écrire sous la forme matricielle suivante :

On a :

$$\text{Pour l'étoile 1 : } [v_{s1}] = [R_{s1}][I_{s1}] + \frac{d[\Psi_{s1}]}{dt}$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } [v_{s2}] = [R_{s2}][I_{s2}] + \frac{d[\Psi_{s2}]}{dt}$$

$$\text{Pour le rotor : } [0] = [v_r] = [R_r][I_{s1}] + \frac{d[\Psi_r]}{dt}$$

$$\text{Avec : La matrice de tension de l'étoile 1 : } [v_{s1}] = \begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de tension de l'étoile 2 : } [v_{s2}] = \begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de tension de rotor : } [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de courant de l'étoile 1 : } [I_{s1}] = \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{bs1} \\ i_{cs1} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de courant de l'étoile 2 : } [I_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de courant de rotor : } [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de résistance de l'étoile 1 : } [R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{as1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs1} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de résistance de l'étoile 2 : } [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{as2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs2} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de résistance rotorique : } [R_1] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

$$\text{La matrice de flux de l'étoile 1 : } [\Psi_{s1}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as1} \\ \varphi_{bs1} \\ \varphi_{cs1} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de flux de l'étoile 2 : } [\Psi_{s2}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as2} \\ \varphi_{bs2} \\ \varphi_{cs2} \end{bmatrix}$$

$$\text{La matrice de flux de rotor : } [\Psi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{as1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{bs1} \\ i_{cs1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as1} \\ \varphi_{bs1} \\ \varphi_{cs1} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 26})$$

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{as2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as2} \\ \varphi_{bs2} \\ \varphi_{cs2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 27})$$

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 28})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} R_{as1} = R_{bs1} = R_{cs1} = R_{s1} \\ R_{as2} = R_{bs2} = R_{cs2} = R_{s2} \\ R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r \end{cases}$$

### II.5.4.2 Equations magnétique

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotorique en fonction des courants sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} \Psi_{s1} \\ \Psi_{s2} \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [L_{s1,s2}] & [L_{s1,r}] \\ [L_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [L_{s2,r}] \\ [L_{r,s1}] & [L_{r,s2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

Avec :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s1} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s1} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s2} + L_{ms}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_{s2} + L_{ms}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} (L_r + L_{mr}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{mr}) & L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & (L_r + L_{mr}) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s1,s2}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) & L_{ms} \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ms} \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s1,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{4\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos\left(\theta_r - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sr} \cos(\theta_r - \alpha) \end{bmatrix}$$

$$[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t$$

$$[L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t$$

$$[L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

$$L_{ms} = L_{mr} = L_{sr} = \frac{2}{3}L_m$$

### II.5.4.3 Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine asynchrone double étoile est donnée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.30})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \Omega = \frac{w_r}{P} \\ w_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$$(\text{II.32})$$

### II.5.4.4 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_{em} = \frac{\partial w}{\partial \theta_{géo}} = P \frac{\partial W}{\partial \theta_{éle}} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$W = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\Psi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\Psi_{s2}] + [I_r]^t [\Psi_r]) \quad (\text{II.34})$$

Donc :

$$C_{em} = \frac{P}{2} \left( [I_{s1}]^t \frac{d[L_{s1,r}]}{d\theta_r} [I_r]^t + [I_{s2}]^t \frac{d[L_{s2,r}]}{d\theta_r} [I_r]^t \right) \quad (\text{II.35})$$

### II.5.5 Modèle biphasé de la machine asynchrone double étoile

La modélisation de la machine asynchrone double étoile passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égaux. Pour cela, on applique les matrices de passage de Park direct et inverse.

#### II.5.5.1 Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer le système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes  $d, q, o$  (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de Park  $[P(\theta)]$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

Les matrices de passage de Park direct et inverse sont faites à base des égalités des puissances entre les deux systèmes triphasés et biphasés, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [28].

Alors, on applique les transformations de passage de Park direct et inverse, on obtient :

Le passage direct est donné par

$$[Xdqo] = [P][X_{abc}]$$

➤ Le passage inverse est donné par

$$[Xdqo] = [P]^{-1}[X_{abc}]$$

Tel que :

[X] : Peut-être la matrice tension, courant ou flux.

[P]: est la matrice de transformation directe de Park.

[P]<sup>-1</sup>: est la matrice de transformation inverse de Park.

La matrice de park pour l'étoile 1 :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

La matrice de park inverse pour l'étoile 1 :

$$[P(\theta_{s1})]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

La matrice de park pour l'étoile 2 :

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

La matrice de park inverse pour l'étoile 2 :

$$[P(\theta_{s2})]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

La matrice de park pour le rotor :

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

La matrice de park inverse pour le rotor :

$$[P(\theta_r)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

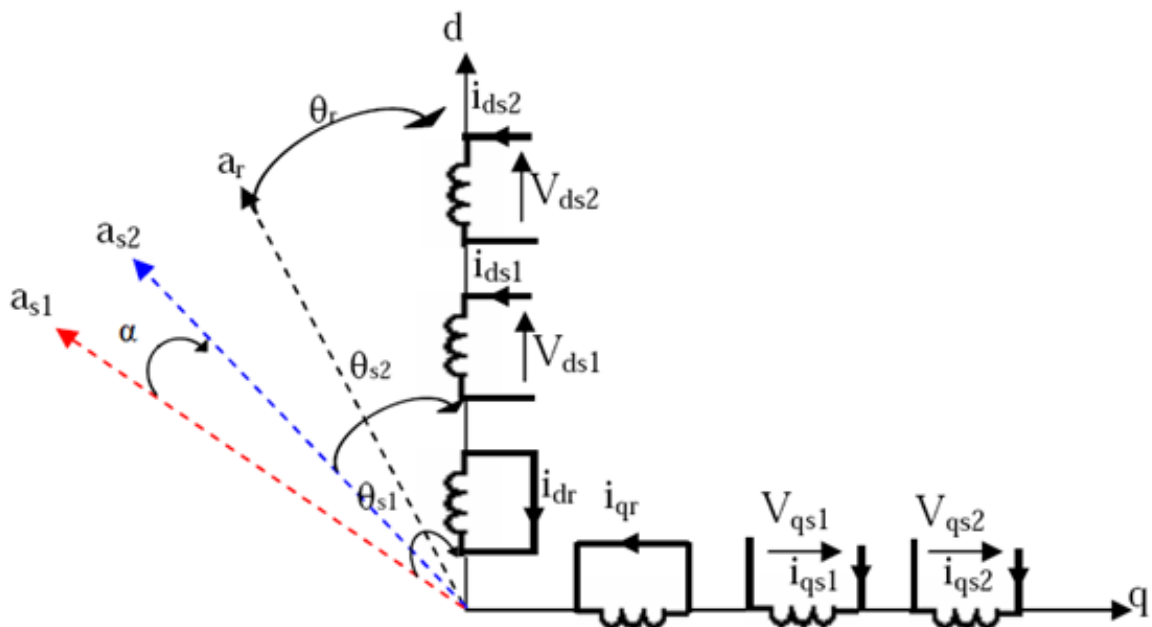


Figure II.8 : Représentation schématique du modèle de Park de la MASDE

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

### II.5.5.2 Choix du référentiel

Les équations de la machine utilisée peuvent être exprimées dans les trois référentiels suivants [22] et [29] :

#### II.5.5.2.1 Référentiel lié au stator (Axes « $\alpha, \beta$ »)

Ce système est immobile par rapport au stator, donc :  $\omega_{\text{coor}} = 0 \rightarrow \theta = 0$

Il est choisi dans le cas où la variation de vitesse de rotation est élevée :

$$\text{On a: } \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt} = 0$$

$$\text{Donc : } \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -p\Omega$$

#### II.5.5.2.2 Référentiel lié au rotor (Axes « $x, y$ »)

Celui-ci est immobile par rapport au rotor, donc :  $\omega_{\text{coor}} = \omega_r \rightarrow \theta = \int_0^t \omega_r dt$

Il est utilisé dans l'étude de régime transitoire où la vitesse de rotation est considérée constante.

$$\text{On a: } \frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$$

#### II.5.5.2.3 Référentiel lié au champ tournant (Axes « $d, q$ »)

Ce dernier est immobile par rapport au champ électromagnétique créée par les enroulements statoriques, donc :  $\omega_{\text{coor}} = \omega_s \rightarrow \theta = \int_0^t \omega_s dt$

Il est souvent choisi dans le cas où la fréquence d'alimentation est constante et sur cette base que nous avons fait ce choix.

$$\text{On a : } \frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

$$\text{Donc : } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega$$

- Nous choisissons dans notre cas le système d'axes « $d, q$ » lié au référentiel du champ tournant car il est le plus approprié, en particulier pour les machine asynchrone double étoile. Ce système permet de ramener les grandeurs variables à des grandeurs continues.

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.5.6 Modèle biphasé de la MASDE liée au système d'axes « $d, q$ »

En appliquant la transformation de Park aux tensions ainsi qu'au flux statoriques, cette transformation permet la conservation de la puissance.

Nous obtenons le modèle électrique classique suivant :

➤ Les composantes de la tension :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_s\varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} - \omega_s\varphi_{ds1} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \omega_s\varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} - \omega_s\varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_{gl}\varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_{gl}\varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Avec :  $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = p\Omega = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$

➤ Les composantes du flux :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.43})$$



## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

---

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Avec :  $\frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L_{mr} = \frac{3}{2}L_{sr} = L_m$

En introduisant le système d'équation (II.42), (II.43) et (II.44) dans (II.39), (II.40) et (II.41) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L][i] - \omega_s[D][I] - \omega_{gl}[C][I] + [R][I] \quad (\text{II.45})$$

$[U] = [v_{ds1}, v_{qs1}, v_{ds2}, v_{qs2}, v_{dr}, v_{qr}]^t$  : Vecteur de commande ;

$[I] = [I_{ds1}, I_{qs1}, I_{ds2}, I_{qs2}, I_{dr}, I_{qr}]^t$  : Vecteur d'état ;

$[B] = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$  ;

$[R] = \text{diag} [R_{s1} R_{s1} R_{s2} R_{s2} R_r R_r]$ ;

$$[L] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & (L_{s2} + L_m) & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_{s2} + L_m) & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & (L_{s1} + L_m) & 0 & L_m & 0 & L_m \\ -(L_{s1} + L_m) & 0 & -L_m & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & (L_{s2} + L_m) & 0 & L_m \\ -L_m & 0 & -(L_{s2} + L_m) & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_m & 0 & (L_r + L_m) \\ -L_m & 0 & -L_m & 0 & -(L_r + L_m) & 0 \end{bmatrix}$$

## Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.5.7 Puissance absorbée et couple électromagnétique

#### II.5.7.1 Puissance absorbée

$$\text{On a: } P_a = P_{js} + P_f + P_{jr} + P_m + P_u$$

La puissance absorbée par la MASDE dans le système d'axes « $d, q$ » est défini par :

$$P_a = v_{ds1}i_{ds1} + v_{qs1}i_{qs1} + v_{ds2}i_{ds2} + v_{qs2}i_{qs2} \quad (\text{II.46})$$

En remplaçant les tensions ( $v_{ds1}$ ,  $v_{qs1}$ ,  $v_{ds2}$  et  $v_{qs2}$ ) par leur expressions (II.20), on trouve :

$$P_a = (R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2) + \left( \frac{d\varphi_{ds1}}{dt}i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt}i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt}i_{qs2} \right) + \omega_s[\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}] \quad (\text{II.47})$$

#### II.5.7.2 Expression du Couple électromagnétique

L'expression de couple électromagnétique de la MASDE dans le système d'axes « $d, q$ » est défini par :  $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em}}{\omega_s}$  (II.48)

L'expression du couple électromagnétique est égale à :

$$C_{em} = p(\varphi_{ds1}i_{ds1} - \varphi_{qs1}i_{qs1} + \varphi_{ds2}i_{ds2} - \varphi_{qs2}i_{qs2}) \quad (\text{II.49})$$

En remplaçant les flux ( $\varphi_{ds1}$ ,  $\varphi_{qs1}$ ,  $\varphi_{ds2}$ ,  $\varphi_{qs2}$ ) données par (II.42) et (II.43) dans (II.48),

on obtient :

$$C_{em} = pL_m[(i_{qs1} + i_{qs2})i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})i_{qr}] \quad (\text{II.50})$$

A partir des équations des flux rotorique, on tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r}[\varphi_{dr} - L_m(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (\text{II.51})$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r}[\varphi_{qr} - L_m(i_{qs1} + i_{qs2})] \quad (\text{II.52})$$

En remplaçant (II.50) et (II.51) dans l'équation (II.49) On obtient :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} [(i_{qs1} + i_{qs2})\varphi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\varphi_{qr}] \quad (\text{II.52})$$

## **Chapitre II : Modélisation des éléments de la chaîne de traction**

---

### **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons modélisé la chaîne de traction d'un véhicule électrique à base d'une machine asynchrone à double étoile et une source d'alimentation hybride constituée d'une batterie, d'un super condensateur et d'une pile à combustible.

On a effectué une étude globale de notre système, on a commencé par la modélisation des différentes sources d'énergie embarqué (Batterie, Super condensateur et pile à combustible) ainsi la modélisation de convertisseur statique enfin la modélisation de la machine utilisée dans notre chaîne de traction qui est la machine asynchrone à double étoile dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

Le chapitre suivant fait l'objet de la simulation d'une chaîne de traction d'un véhicule électrique à base d'une machine asynchrone à double étoile et une source d'alimentation hybride constituée d'une batterie, d'un super condensateur et d'une pile à combustible.

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la simulation de comportement dynamique, avec le logiciel Matlab, des éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, dans un premier temps nous présentons la simulation des sources d'énergie : la batterie, super condensateur et la pile à combustible, dans un deuxième temps nous présentons la simulation de la machine utilisée qui est la machine asynchrone double étoile, et enfin en terminant par la simulation du système de traction complet.

### III.2 Simulation de la Batterie

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle de la batterie CIEMAT sous l'environnement Matlab/Simulink.

#### III.2.1 Schéma bloc

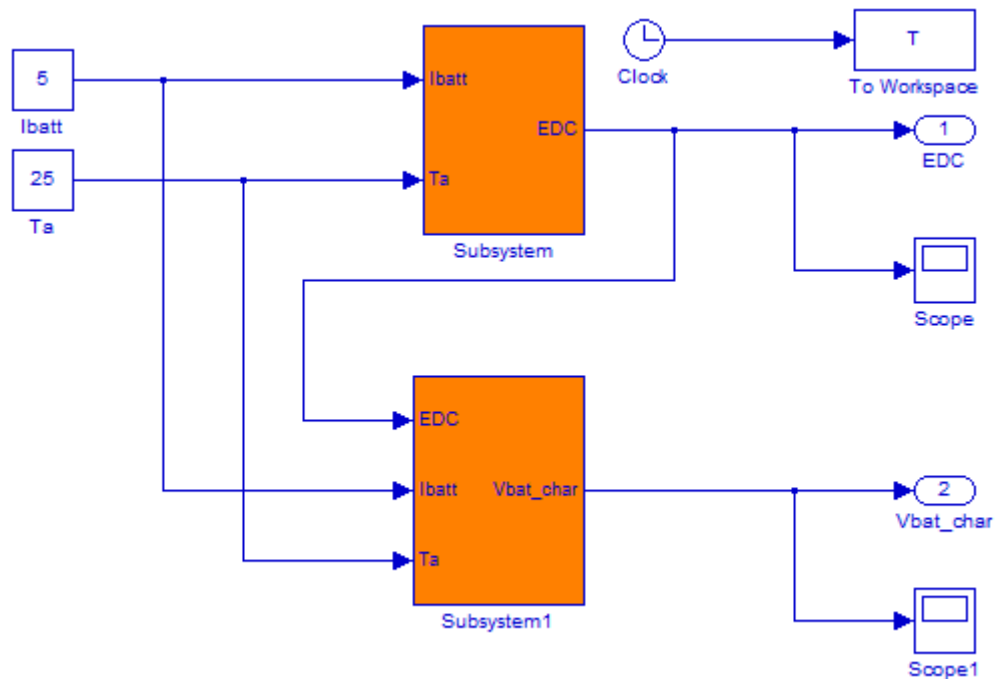


Figure III.1 : Modèle d'une batterie sous Matlab/Simulink

# Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction

## III.2.2 Résultats de Simulation

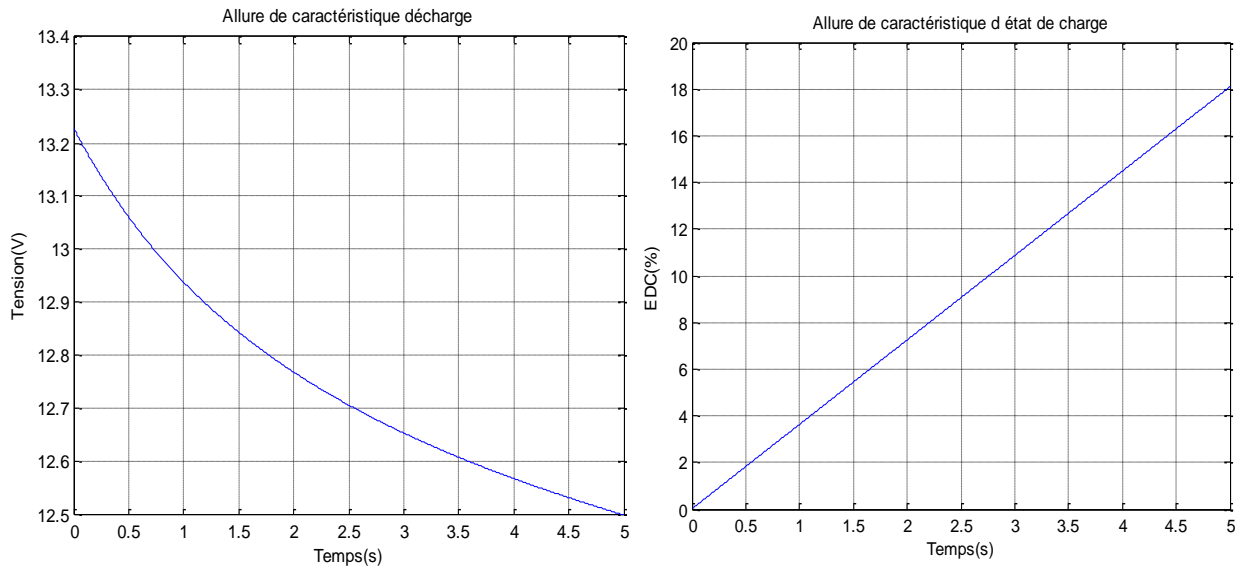


Figure III.2 : Résultats de simulation de la Batterie

## III.3 Simulation de super condensateur

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle de super condensateur sous l'environnement Matlab/Simulink

### III.3.1 Schéma bloc

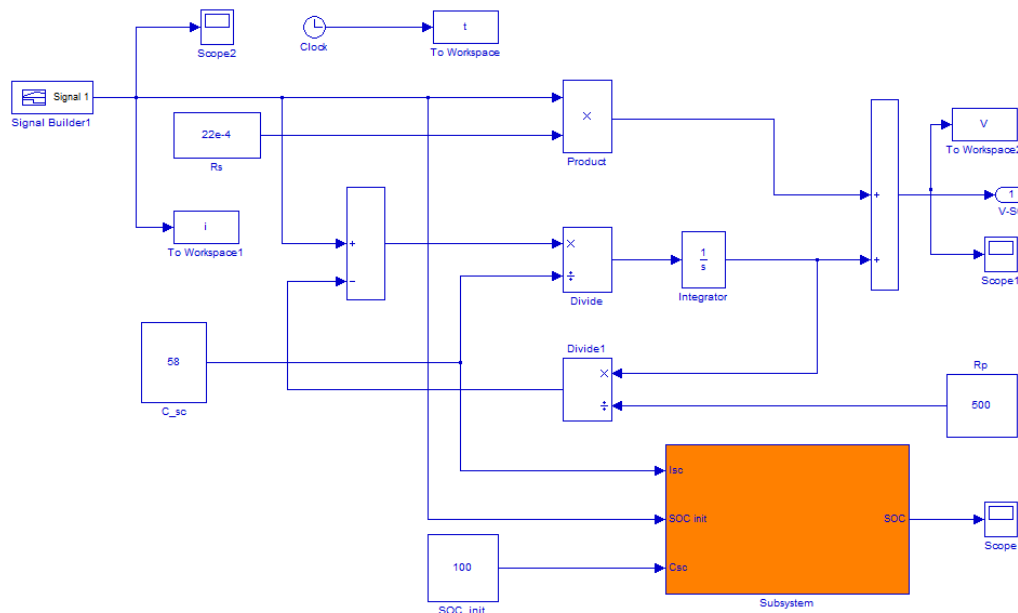


Figure III.3 : Modèle d'un super condensateur sous Matlab/Simulink

# Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction

## III.3.2 Résultats de simulation

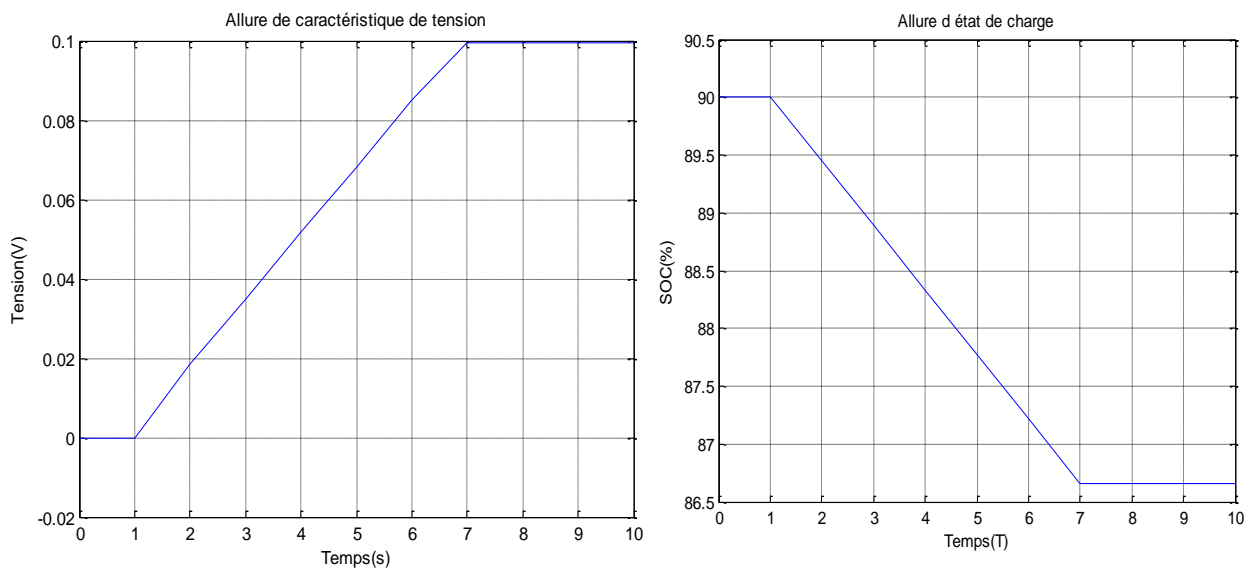


Figure III.4 : Résultats de Simulation du super condensateur

## III.4 Simulation de la pile à combustible

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle de la pile à combustible PEMFC sous l'environnement Matlab/Simulink.

### III.4.1 Schéma bloc

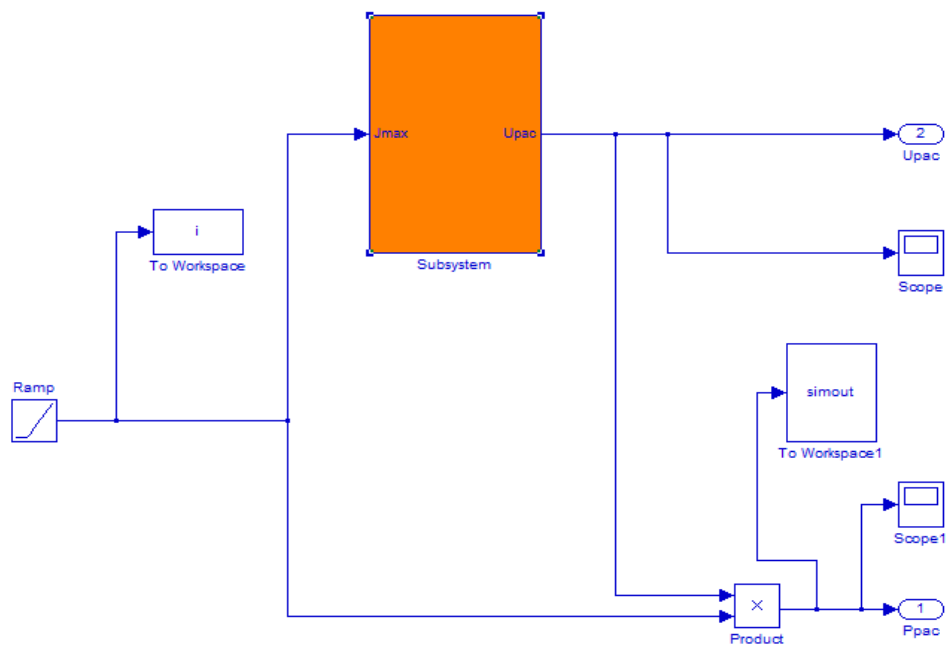


Figure III.5 : Modèle d'une pile à combustible sous Matlab/Simulink

## III.4.2 Résultats de simulation

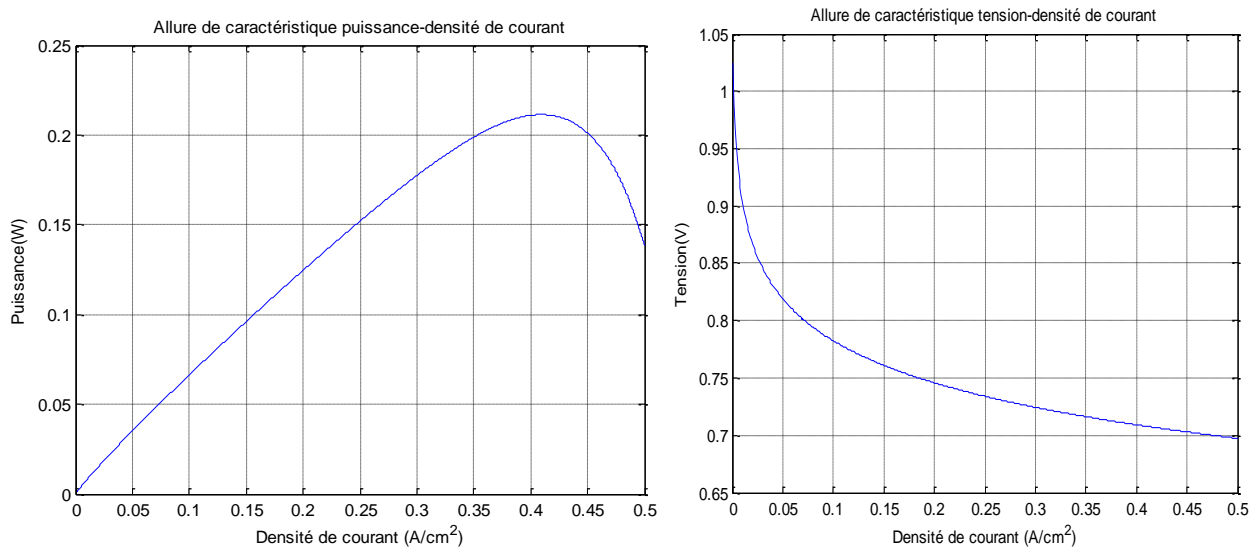


Figure III.6 : Résultats de simulation de la pile à combustible

## III.5 Simulation d'une machine asynchrone double étoile

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle électromécanique de la MASDE sous l'environnement Matlab/Simulink.

La MASDE est alimentée par des sources purement sinusoïdales et équilibrées, exprimées comme suit :

– Pour la première étoile :

$$v_{as1} = V_m \sin(\omega_s t)$$

$$v_{bs1} = V_m \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3})$$

$$v_{cs1} = V_m \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3})$$

Avec :

$$V_m = \sqrt{2}V_{eff};$$

– Pour la seconde étoile, il suffit de remplacer dans le système d'équations

$(v_{as1}, v_{bs1} \text{ et } v_{cs1})$ ,  $(\omega_s t)$  par  $(\omega_s t - \alpha)$  et l'indice 1 par 2 ;

– Pour le rotor, les tensions  $(v_{ar}, v_{br} \text{ et } v_{cr})$  sont nulles (rotor à cage d'écureuil).

## III.5.1 Schéma bloc

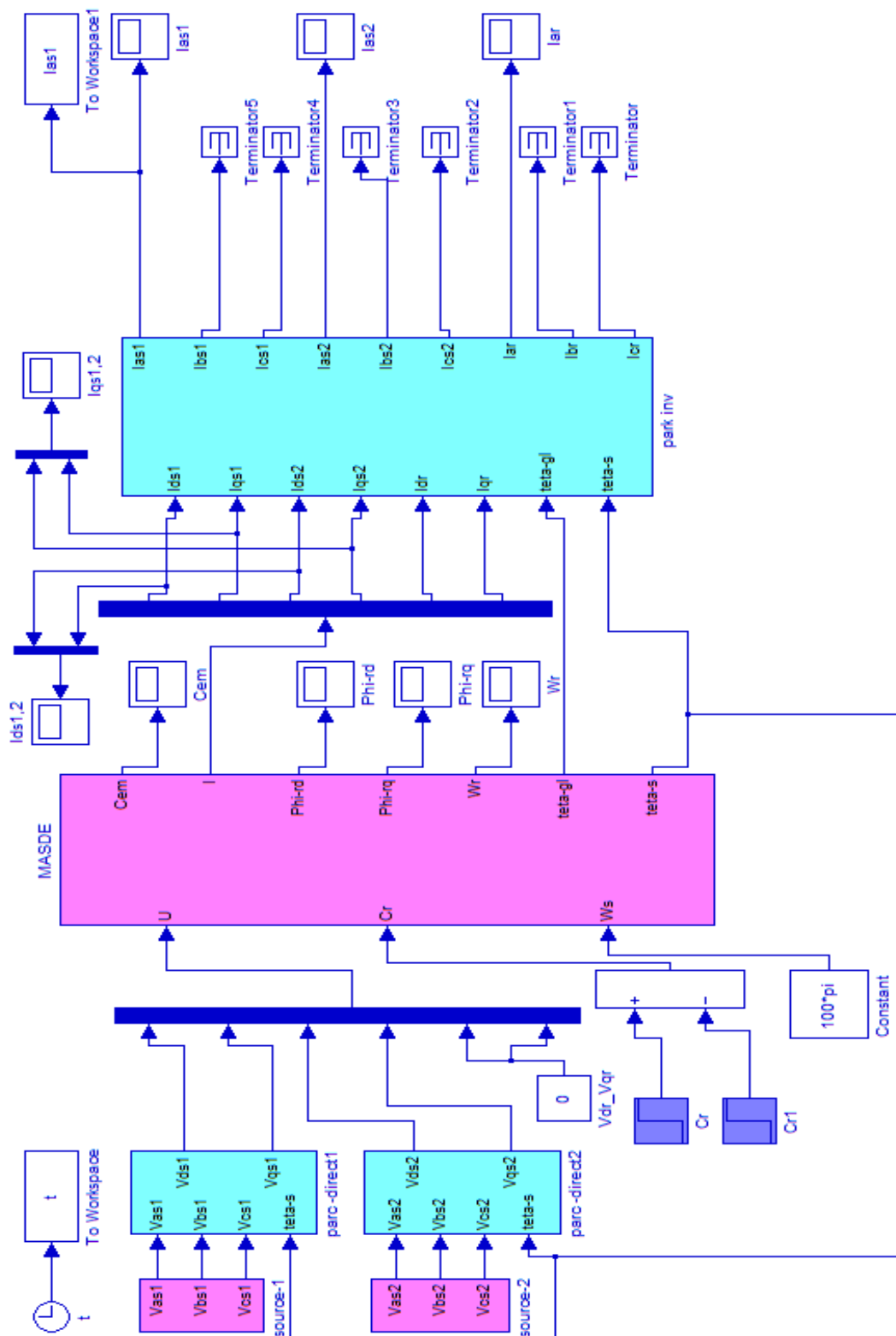
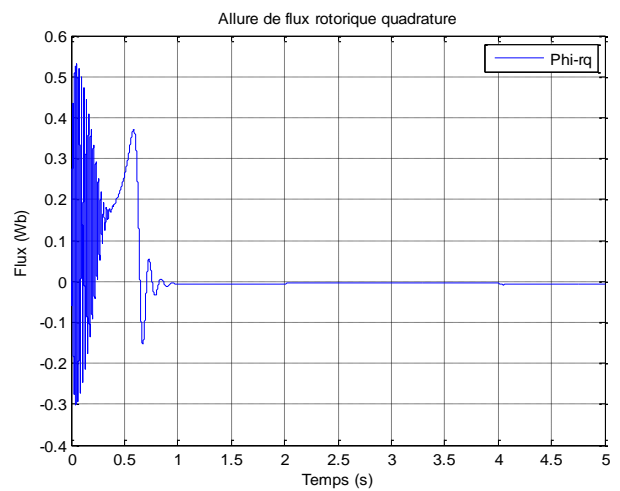
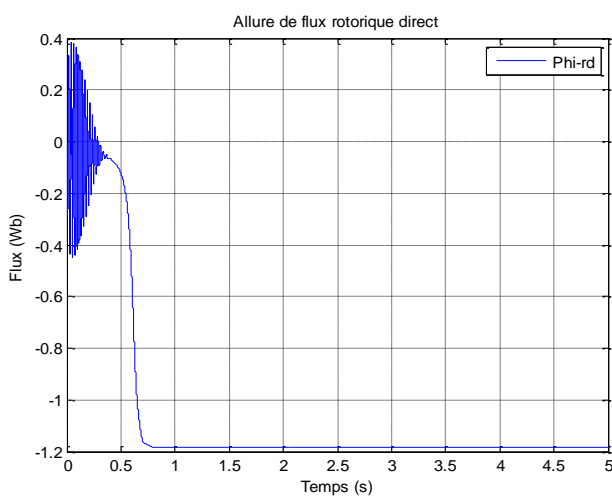
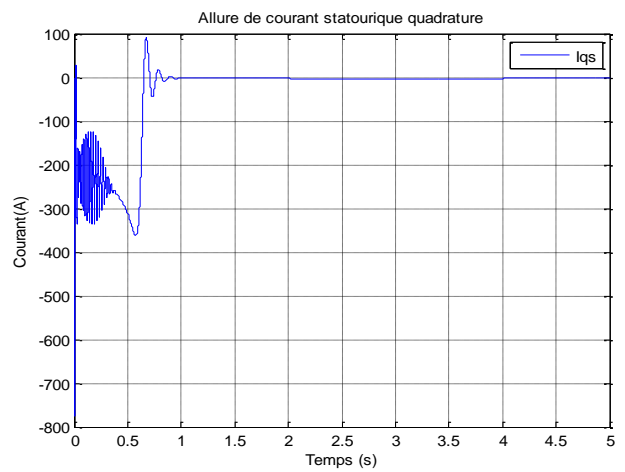
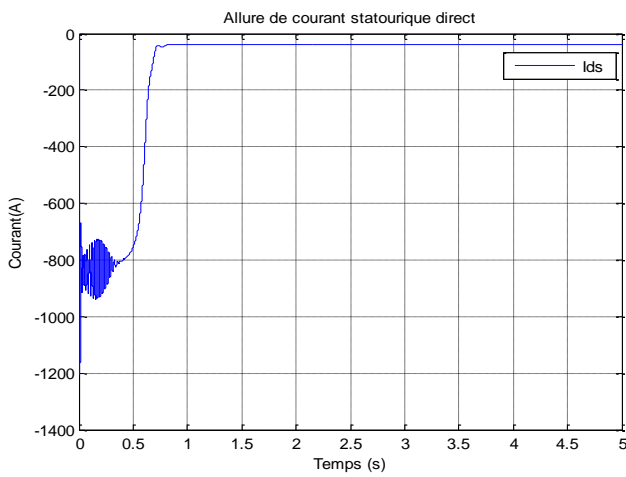
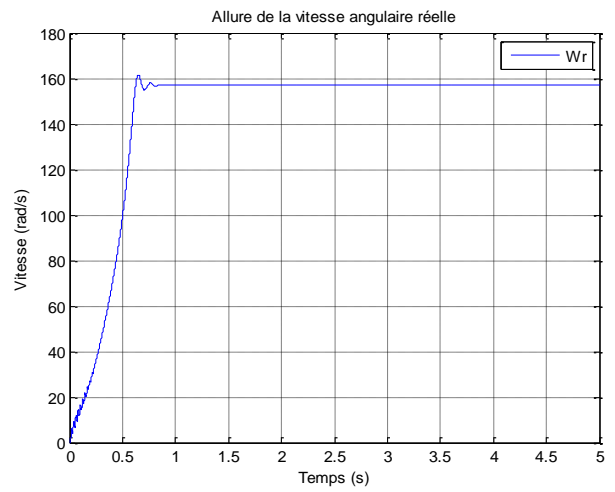
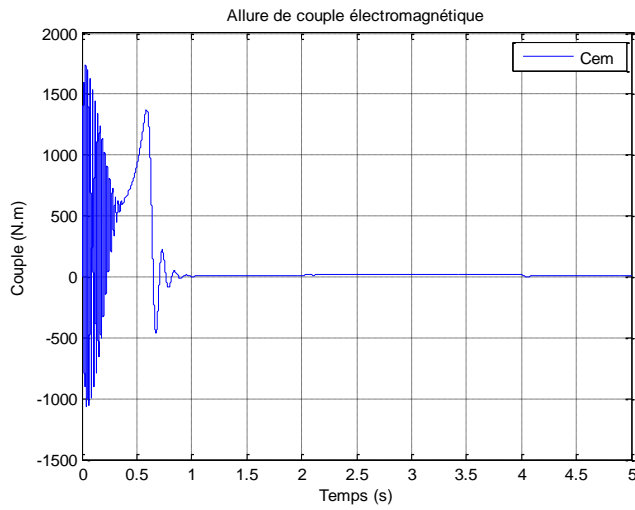


Figure III.7 : Modèle d'une MASDE sous Matlab/Simulink



# Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction

## III.5.2 Résultats de Simulation



# Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction

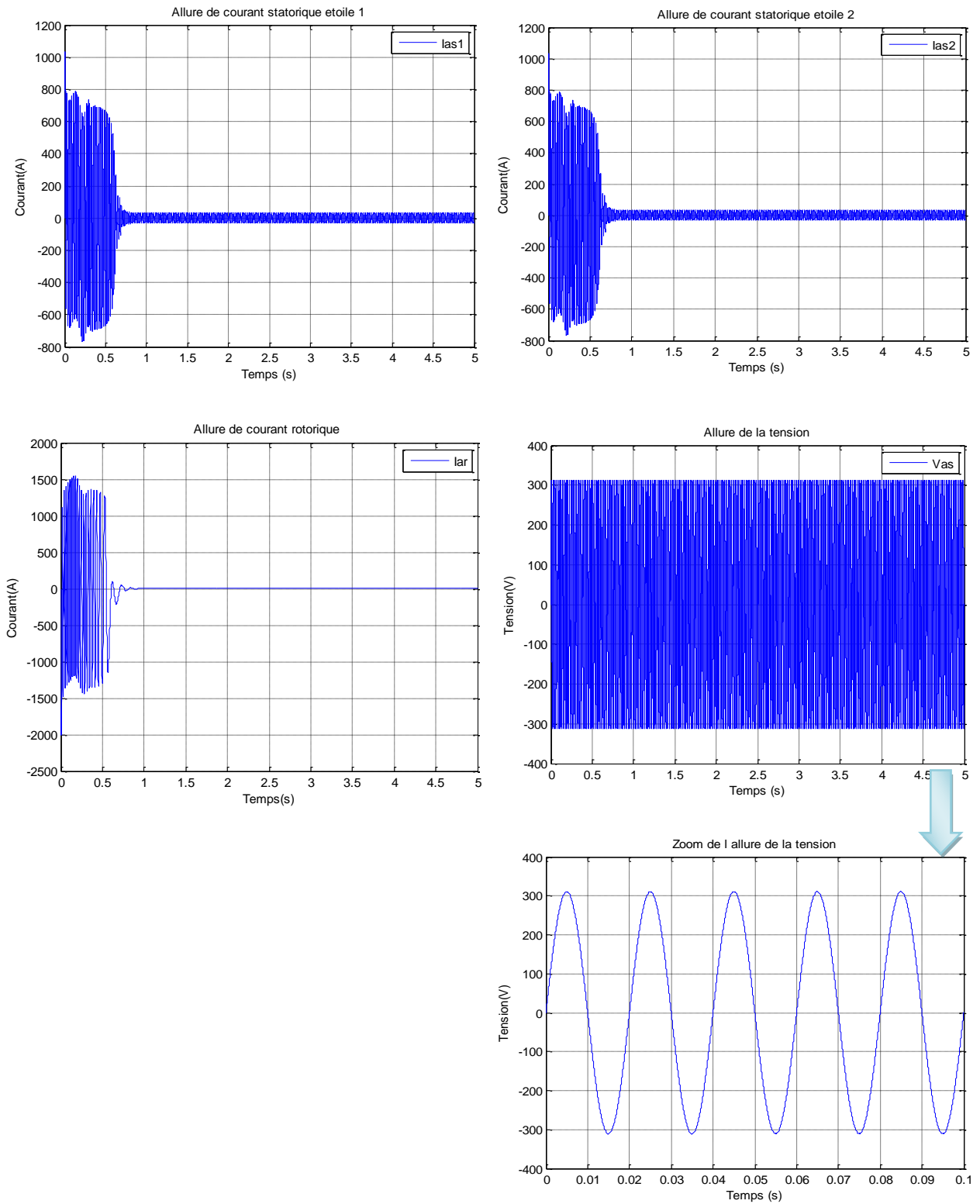
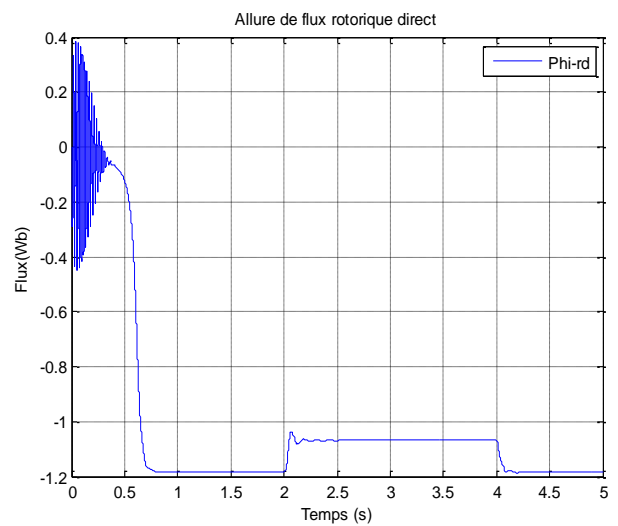
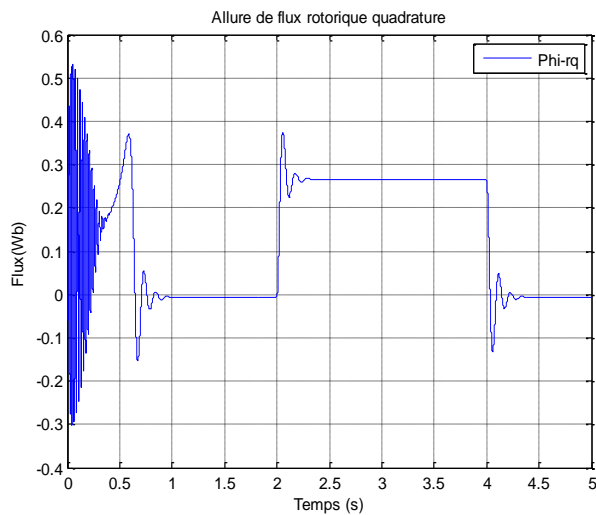
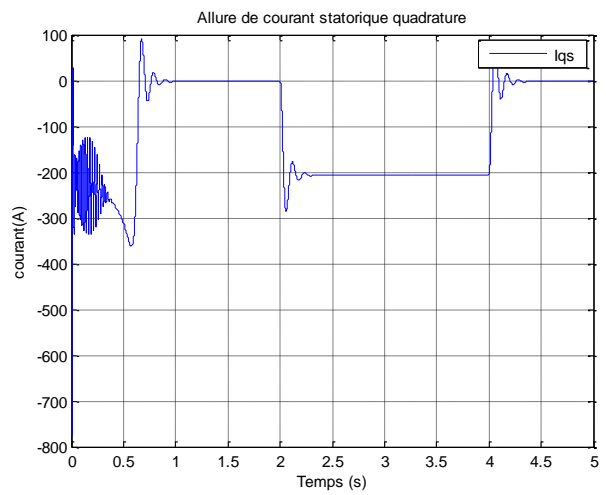
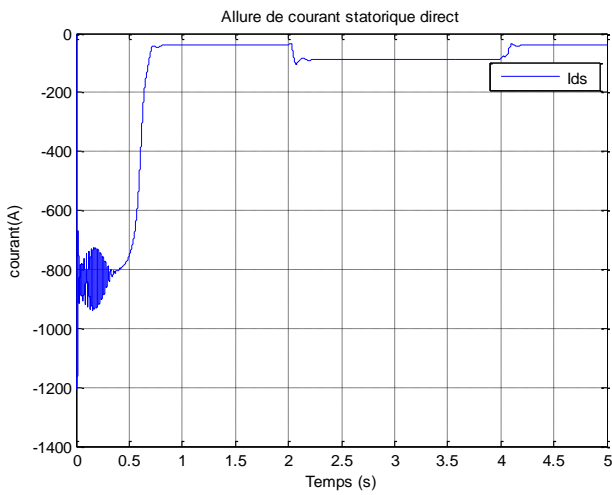
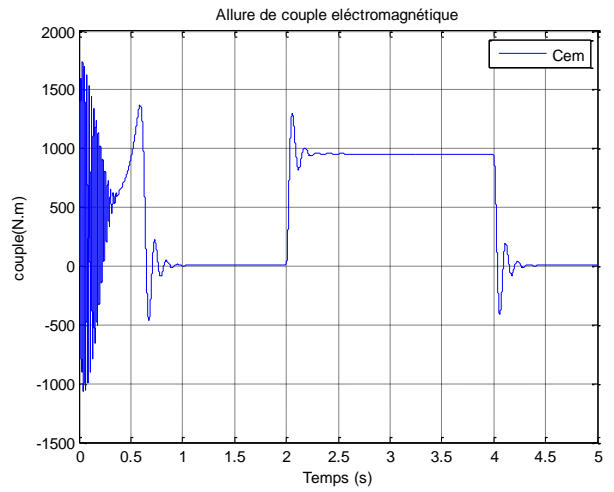
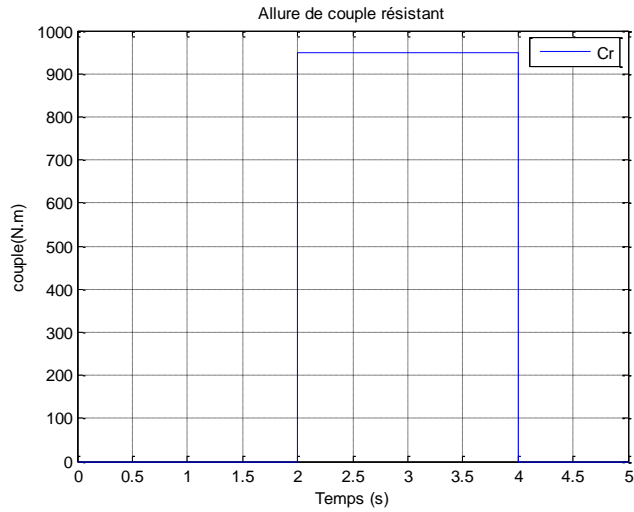


Figure III.8 : Résultats de Simulation de la MASDE essai à vide

# Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction



# Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction

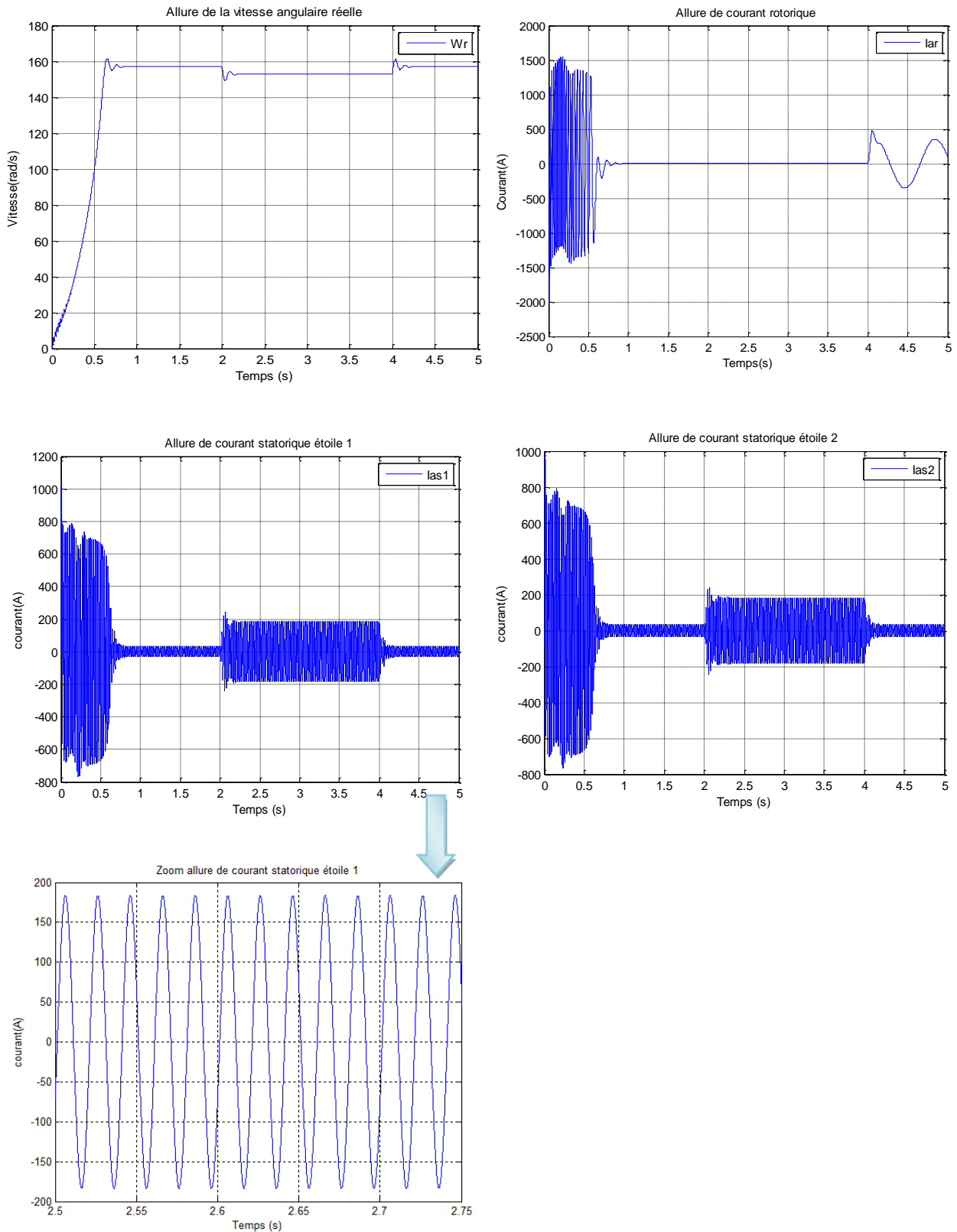


Figure III.9 : Résultats de Simulation de la MASDE avec un couple résistant  $C_r=950\text{N.m}$

### III.6 Système de traction d'un VE

Notre travail consiste à simuler la chaîne de traction d'un véhicule électrique à base d'une machine asynchrone double étoile et un onduleur commander par la commande MLI avec une source d'alimentation de 600V qui remplace les sources d'énergie hybride : la batterie, super condensateur et la pile à combustible.

#### III.6.1 Commande MLI

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [7].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{cases} V_{ref\ a1} = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_{ref\ b1} = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref\ c1} = V_m \sin(2\pi ft) + \frac{2\pi}{3} \end{cases}$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{cases} V_{ref\ a1} = V_m \sin(2\pi ft - \alpha) \\ V_{ref\ b1} = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3} - \alpha) \\ V_{ref\ c1} = V_m \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3} - \alpha) \end{cases}$$

La commande MLI est caractérisée par les deux paramètres :

- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de modulation ( $fp$ ) sur la fréquence de référence ( $f$ ) ;
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_m$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{pm}$ ).

## III.6.2 Schéma bloc

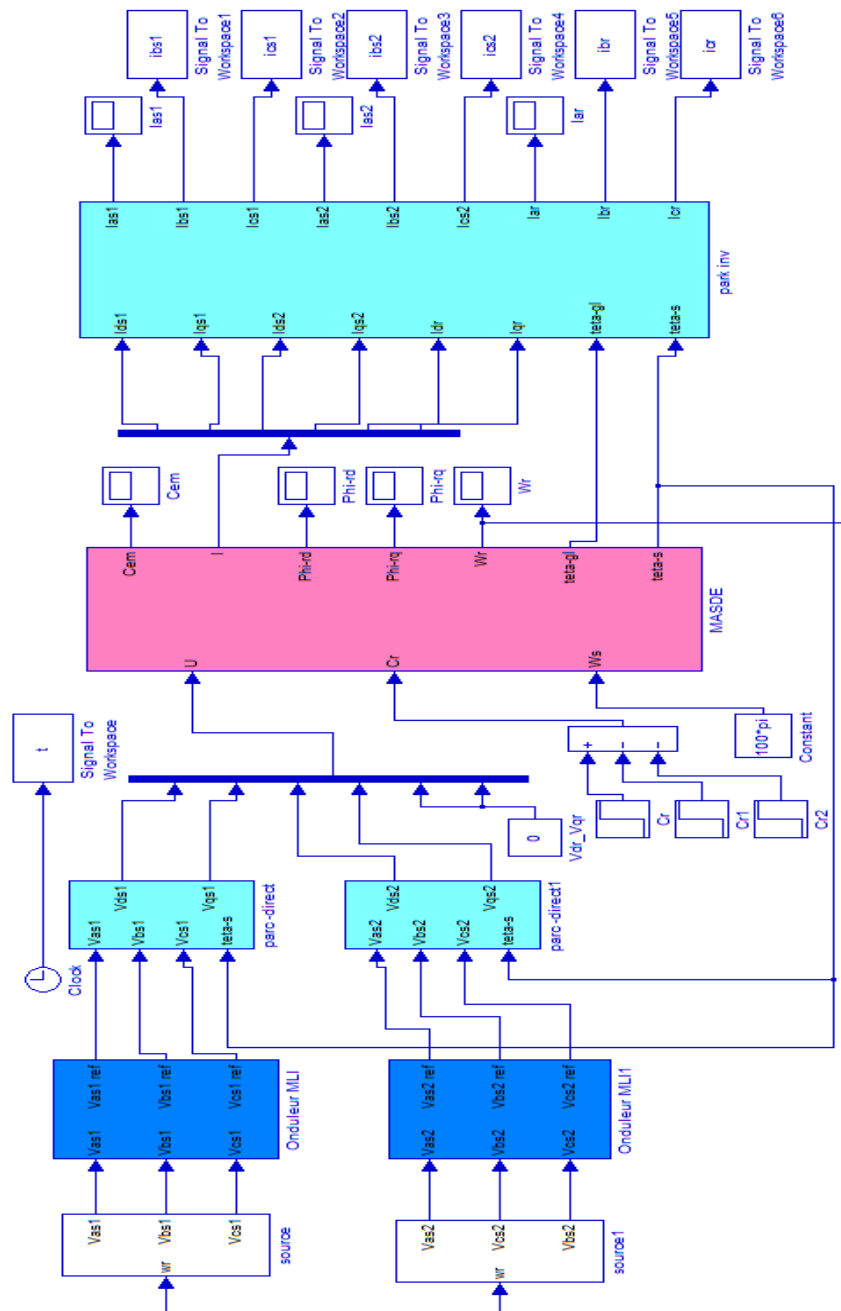
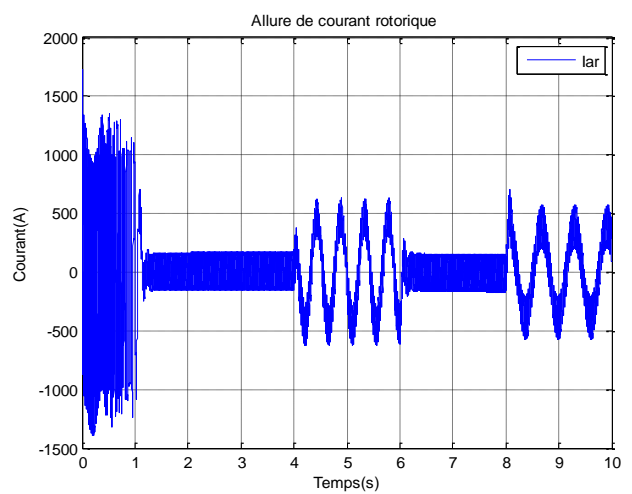
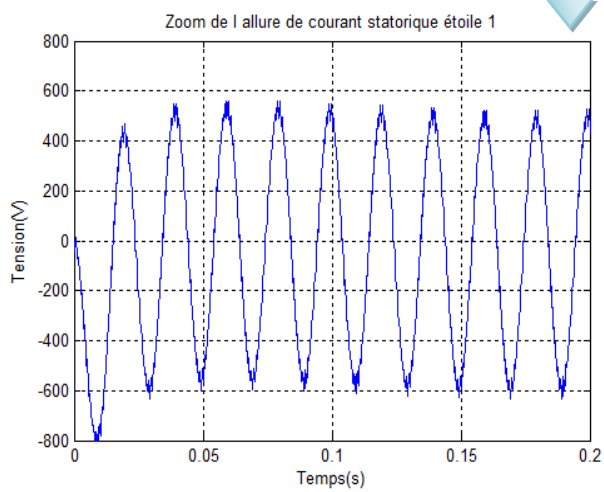
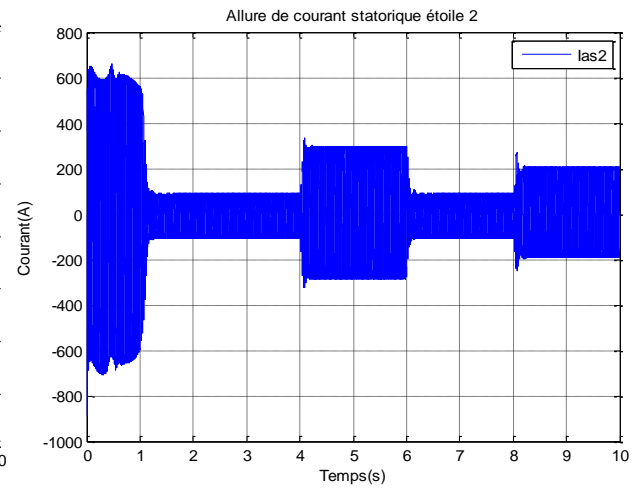
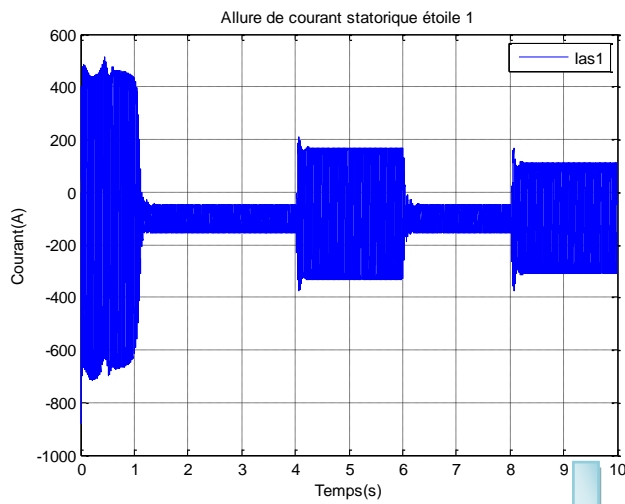
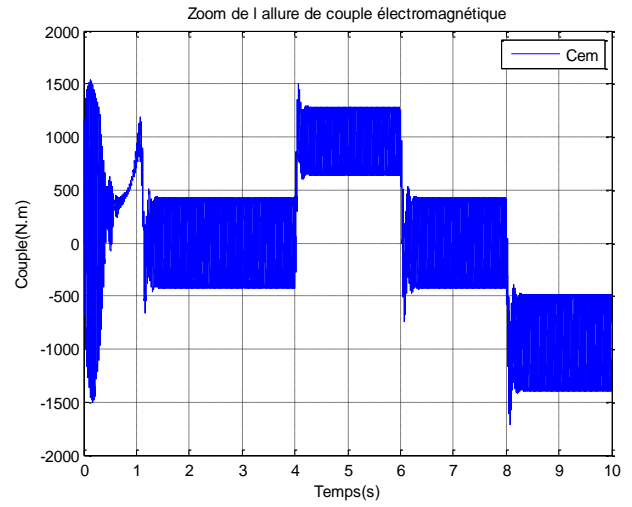
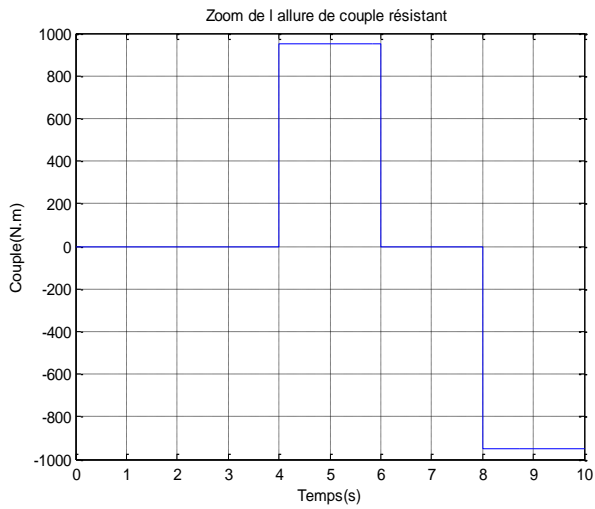


Figure III.10 : Modèle d'un system de traction sous Matlab/Simulink

# Chapitre III : Simulation des éléments de la chaîne de traction

## III.6.3 Résultats de Simulation



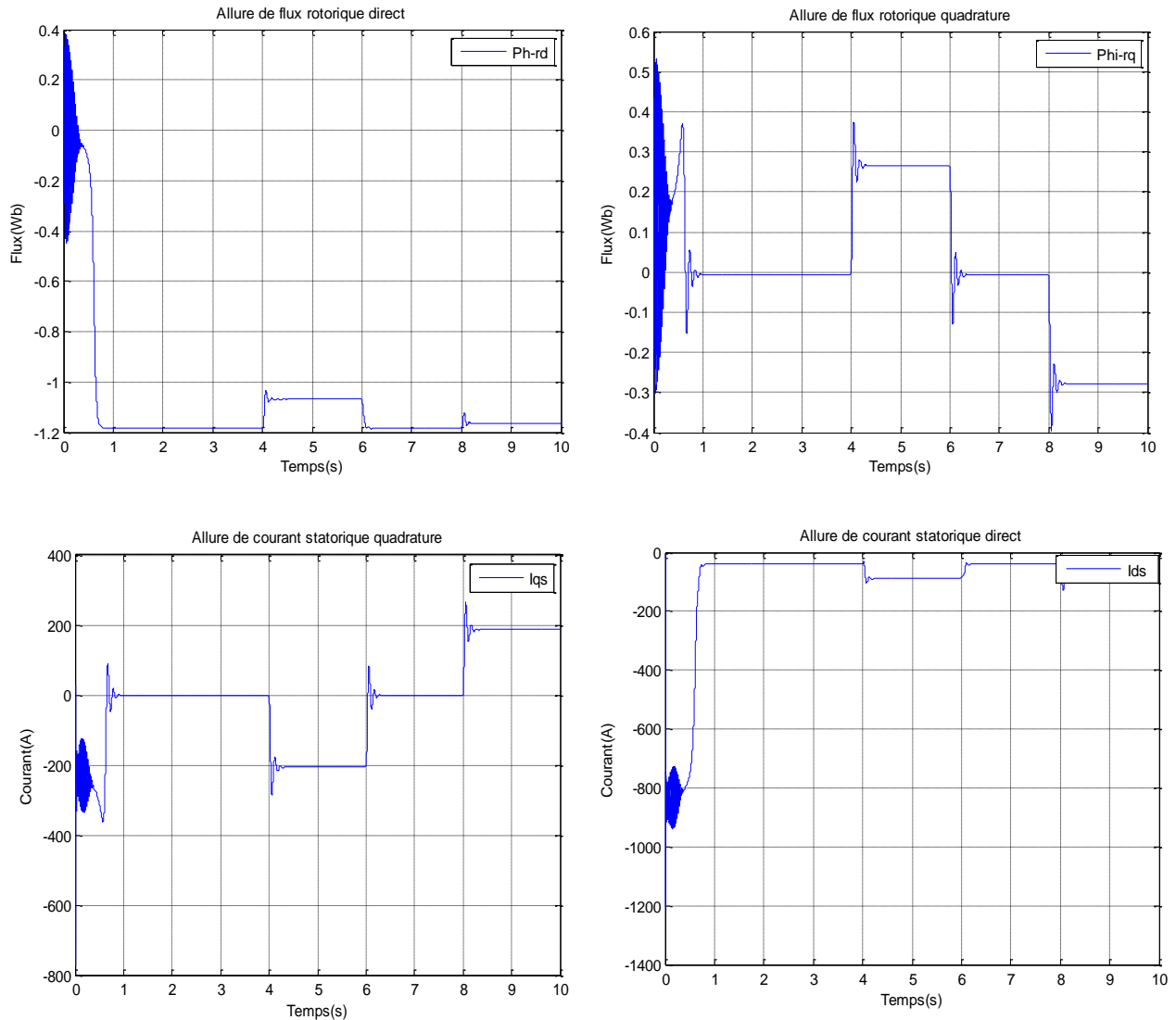


Figure III.11 : Résultats de Simulation d'un système de traction

### III.6.4 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus avec une source d'alimentation de 600V à base d'un onduleur MLI présentent une similitude remarquable avec ceux de l'alimentation directe. Mais néanmoins les allures de toutes les grandeurs électriques des axes (direct et quadratique) révèlent que cette stratégie engendre une augmentation des ondulations par rapport à l'alimentation directe.



### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons simulé les éléments de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, constitué d'une machine asynchrone double étoile et une source d'alimentation hybride composée d'une batterie, d'un super condensateur et d'une pile à combustible.

Après la réalisation des schémas bloc sur l'environnement Matlab/Simulink on a commencé par la simulation des différentes sources d'énergie embarqué (Batterie, Super condensateur et pile à combustible) ainsi la simulation de convertisseur statique (onduleur MLI) enfin la simulation de la machine utilisée (machine asynchrone double étoile), et on a terminé par la présentation des différents résultats obtenues de la simulation.

Le chapitre suivant fait l'objet de commander la machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique en appliquant la commande vectoriel par orientation de flux rotorique.

# Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

---

## IV.1 Introduction

La grande exploitation du contrôle de la machine à induction a commencé par l'invention du contrôle vectoriel par flux orienté à la fin des années 60 [30].

Les techniques de la commande vectorielle appelées aussi commande à orientation du flux ont pour but d'assurer un certain découplage dans les moteurs à courant alternatif de façon à ce que le flux et le couple de ces moteurs soient commandés indépendamment. Ces techniques tirent leur idée de base du modèle "dq" du moteur asynchrone dans le repère synchrone et de la façon dont les moteurs à courant continu à excitation séparée sont commandés. Elles sont basées sur l'orientation du flux dans la machine selon l'axe d, ce qui assure de ce fait que sa composante quadrature demeure tout le temps nulle. Le couple et le flux peuvent être contrôlés par deux différentes composantes du courant statorique. En maintenant le flux constant, le couple peut être réglé de façon indépendante du flux [30].

Dans ce chapitre nous allons appliquer la commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique d'une machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique.

## IV.2 Principe de la commande vectorielle

La technique de la commande vectorielle repose sur le fait d'introduire une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage du couple similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. Cette dernière présente une qualité intrinsèque, car elle permet un contrôle séparé du flux et du couple [31].

L'expression du couple électromagnétique d'une machine à courant continu est donnée par :

$$C_{em} = K\varphi_f i_a + K' i_f \quad (IV.1)$$

Avec :

$\varphi_f$  : Flux imposé par le courant d'excitation  $i_f$  ;

$i_a$  : Courant d'induit ;

$K, K'$  : Constante.

Pour la machine asynchrone double étoile, la commande vectorielle consiste à réaliser un découplage des grandeurs du couple électromagnétique et du flux rotorique [7].

## Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

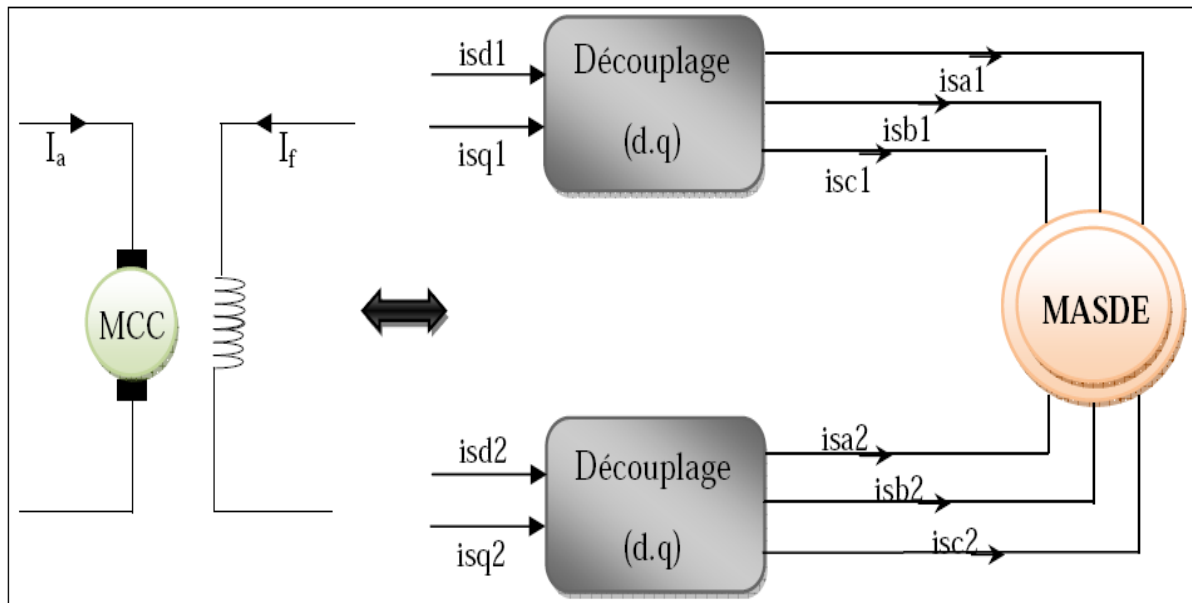


Figure. IV.1 Principe de pilotage vectoriel de la MCC et de la MASDE

### IV.3 Choix d'orientation du flux

La méthode de commande à flux orienté est basée sur le choix du repère de référence suivant la vitesse attribuée au repère  $(d, q)$ , de ce fait, les choix concernant l'alimentation et le repère a été accomplis, dont l'alimentation en tension et le repère lié au champ tournant.

Alors l'étape suivante du raisonnement consiste à fixer l'orientation du flux [31].

On peut définir trois choix qui sont possibles :

- Orientation du flux rotorique :

$$\varphi_{dr} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{qr} = 0 \quad (\text{IV.2})$$

- Orientation du flux statorique :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

- Orientation du flux d'entrefer :

$$\varphi_{dg} = \varphi_g \text{ et } \varphi_{qg} = 0 \quad (\text{IV.4})$$

## Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

---

Pour la MASDE, on opte pour le choix de l'orientation du flux rotorique, car cela permet d'aboutir à un variateur de vitesse où le flux et le couple électromagnétique sont indépendamment commandés à travers les courants statoriques.

L'expression du couple électromagnétique de la machine asynchrone double étoile est fonction des courants statoriques et du flux rotorique. On obtient la forme du couple électromagnétique suivante :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_m + L_r} \varphi_r (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (IV.5)$$

D'après l'équation (IV.5), nous constatons que le couple électromagnétique résulte de l'interaction d'un terme de flux et d'un terme de courant. Cette expression rappelle le couple de la machine à courant continu à excitation séparée.

### IV.4 Différentes méthodes de la commande vectorielle

La commande vectorielle de la MASDE peut être soit directe ou indirecte. [31], [32]

#### IV.4.1 Commande vectorielle directe

Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quel que soit le régime de fonctionnement, pour cela deux procédés sont utilisés :

- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine en plaçant une spire sous un pôle de chaque phase. L'inconvénient principal de cette technique, réside dans le fait que la fragilité et les problèmes de fiabilité limitent sa mise en œuvre ;
- L'estimation du flux à l'aide de la mesure des tensions et des courants statoriques.

Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

#### IV.4.2 Commande vectorielle indirecte

La méthode indirecte est basée uniquement sur la position de flux sans l'utilisation d'amplitude, C'est pour ça que le flux est contrôlé en boucle ouverte.

### IV.5 Commande vectorielle indirecte sans réglage de vitesse

Les lois de commande sont obtenues à partir des équations de la MASDE liées au champ tournant et par orientation du flux rotorique où la position du flux est déduite de la relation donnant la vitesse du glissement. On considère comme grandeurs de référence le flux rotorique  $\varphi_{rref}$  et le couple électromagnétique  $C_{emref}$  [32].

En tenant compte de la condition :  $\varphi_{dr} = \varphi_{rref}$  et  $\varphi_{qr} = 0$

## Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

---

Le système d'équation :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m} (I_{ds1} + I_{ds2}) \\ I_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m} (I_{qs1} + I_{qs2}) \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

Devient :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - L_m(I_{ds1} + I_{ds2})}{L_r + L_m} \\ I_{qr} = \frac{-L_m(I_{qs1} + I_{qs2})}{L_r + L_m} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

En remplaçant (IV.7) dans (II.42), (II.43) et (II.44) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \lambda_1 I_{ds1} + L_r \eta I_{ds2} + \eta \varphi_{rref} \\ \varphi_{qs1} = \lambda_1 I_{qs1} + L_r \eta I_{qs2} \\ \varphi_{ds2} = \lambda_2 I_{ds2} + L_r \eta I_{ds1} + \eta \varphi_{rref} \\ \varphi_{qs2} = \lambda_2 I_{qs2} + L_r \eta I_{qs1} \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

Avec :  $\eta = \frac{L_m}{L_r + L_m}$  Et  $\lambda_{1,2} = L_{s1,2} + \eta L_r$

On a aussi :

$$\varphi_{rref} = L_m (I_{ds1} + I_{ds2}) \quad (\text{IV.9})$$

$$I_{qr} = \frac{-L_m(I_{qs1} + I_{qs2})}{L_r + L_m} \quad (\text{IV.10})$$

$$I_{qr} = \frac{-\omega_{glref} \varphi_{rref}}{R_r} \quad (\text{IV.11})$$

En remplaçant (IV.8), (IV.9) et (IV.10) dans le système d'équation (II.39), (II.40) et (II.41)

On trouve :

$$\begin{cases} V_{ds1ref} = R_{s1} I_{ds1} + L_{s1} \frac{dI_{ds1}}{dt} - \omega_{sref} (L_{s1} I_{qs1} + T_r \varphi_{rref} \omega_{glref}) \\ V_{qs1ref} = R_{s1} I_{qs1} + L_{s1} \frac{dI_{qs1}}{dt} - \omega_{sref} (L_{s1} I_{ds1} + \varphi_{rref}) \\ V_{ds2ref} = R_{s2} I_{ds2} + L_{s2} \frac{dI_{ds2}}{dt} - \omega_{sref} (L_{s2} I_{qs2} + T_r \varphi_{rref} \omega_{glref}) \\ V_{qs2ref} = R_{s2} I_{qs2} + L_{s2} \frac{dI_{qs2}}{dt} - \omega_{sref} (L_{s2} I_{ds2} + \varphi_{rref}) \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Avec :  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  et  $\omega_{glref} = \omega_{sref} - \omega_r$

## Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

---

En introduisant l'équation (IV.10) dans (IV.11), on obtient :

$$\omega_{glref} = \frac{R_r L_m}{(L_r + L_m) \varphi_{rref}} (I_{qs1} + I_{qs2}) \quad (IV.13)$$

A partir de la relation (IV.5), on obtient :

$$I_{qs1} + I_{qs2} = \frac{(L_r + L_m)}{P L_m \varphi_{rref}} C_{emref} \quad (IV.14)$$

Donc :

$$C_{emref} = P \frac{L_m}{L_r L_m} \varphi_{rref} (I_{sq1} + I_{sq2}) \quad (IV.15)$$

L'expression du couple montre que le flux de référence et les courants statoriques en quadrature ne sont pas parfaitement indépendants. Donc, il est nécessaire de découpler la commande du couple et celle du flux de cette machine en introduisant de nouvelles variables

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds1} = R_{s1} I_{ds1} + L_{s1} \frac{dI_{ds1}}{dt} \\ V_{qs1} = R_{s1} I_{qs1} + L_{s1} \frac{dI_{qs1}}{dt} \\ V_{ds2} = R_{s2} I_{ds2} + L_{s2} \frac{dI_{ds2}}{dt} \\ V_{qs2} = R_{s2} I_{qs2} + L_{s2} \frac{dI_{qs2}}{dt} \end{array} \right. \quad (IV.16)$$

Le système (IV.16) montre que les tensions statoriques ( $V_{ds1}, V_{qs1}, V_{ds2}, V_{qs2}$ ) sont directement reliées aux courants statoriques ( $I_{ds1}, I_{qs1}, I_{ds2}, I_{qs2}$ ). Pour compenser l'erreur introduite lors du découplage, les tensions statoriques de références ( $V_{ds1ref}, V_{qs1ref}, V_{ds2ref}, V_{qs2ref}$ ) à flux constant sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds1ref} = V_{ds1} - V_{ds1c} \\ V_{qs1ref} = V_{qs1} - V_{qs1c} \\ V_{ds2ref} = V_{ds2} - V_{ds2c} \\ V_{qs2ref} = V_{qs2} - V_{qs2c} \end{array} \right. \quad (IV.17)$$

Avec :

## Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

---

$$\begin{cases} V_{ds1c} = \omega_{sref}(L_{s1}I_{qs1} + T_r\varphi_{rref}\omega_{glref}) \\ V_{qs1c} = \omega_{sref}(L_{s1}L_{ds1} + \varphi_{rref}) \\ V_{ds2c} = \omega_{sref}(L_{s2}I_{qs2} + T_r\varphi_{rref}\omega_{glref}) \\ V_{qs2c} = \omega_{sref}(L_{s2}L_{ds2} + \varphi_{rref}) \end{cases} \quad (IV.18)$$

Pour un découplage parfait, on ajoute les boucles de régulation des courants statoriques ( $I_{ds1}, I_{qs1}, I_{ds2}, I_{qs2}$ ) et on obtient à leurs sorties les tensions statoriques ( $V_{ds1}, V_{qs1}, V_{ds2}, V_{qs2}$ ).

### IV.6 Commande vectorielle indirecte avec régulation de vitesse

Le principe de cette méthode consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux rotorique mais simplement sa position calculée en fonction des grandeurs de référence. Cette méthode élimine donc le besoin d'utiliser un capteur de flux, mais nécessite l'utilisation d'un capteur de vitesse rotorique [33].

#### IV.6.1 Bloc de défluxage

Le flux est généralement maintenu constant à sa valeur nominale :  $\varphi_{nr}$  pour des vitesses rotorique inférieures ou égales à la vitesse nominale de la machine  $\Omega_n$  [32].

Pour les vitesses importantes, le flux décroît lorsque la vitesse augmente afin de limiter la tension aux bornes de la machine. Donc, on définit le flux de références comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{rref} = \varphi_n & \text{si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_{rref} = \varphi_n \frac{\Omega_n}{|\Omega|} & \text{si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (IV.19)$$

Donc le bloc de défluxage est défini par la fonction non linéaire (IV.19), et schématisé par la Figure (IV.3).

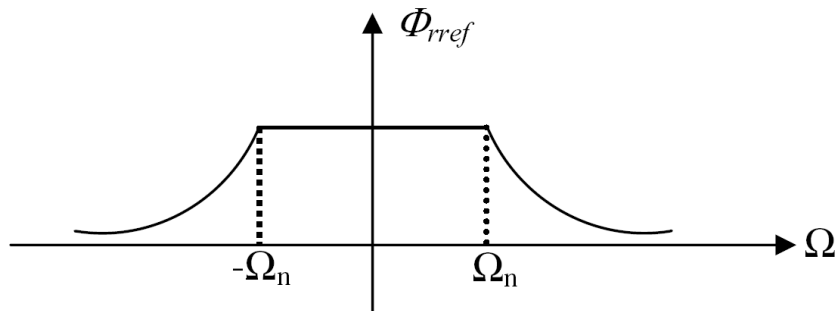


Figure. IV.2 Bloc de défluxage

# Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

## IV.6.2 Régulateur de vitesse

Le schéma de régulation de la vitesse est présenté sur la figure suivante :

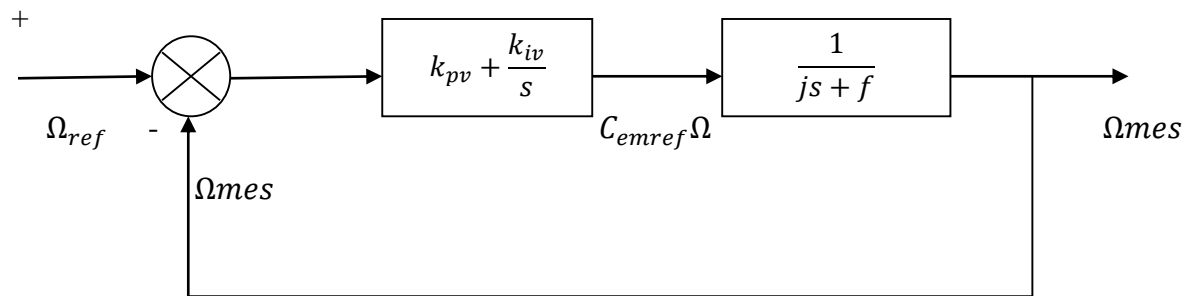


Figure .IV.3 : schéma d'un régulateur de vitesse

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\Omega}{\Omega_{rref}} = \frac{k_{pv}s + k_{iv}}{jS^2 + (f + k_{pv})s + k_{iv}} \quad (IV.20)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} k_{pv} = \frac{j}{\tau} \\ k_{iv} = \frac{kf}{\tau} \end{cases}$$

## IV.7 Simulation de la commande de la MASDE

Pour la simulation, il suffit d'implanter le bloc FOC sous l'environnement Matlab/Simulink



# Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

## IV.7.1 Schéma bloc

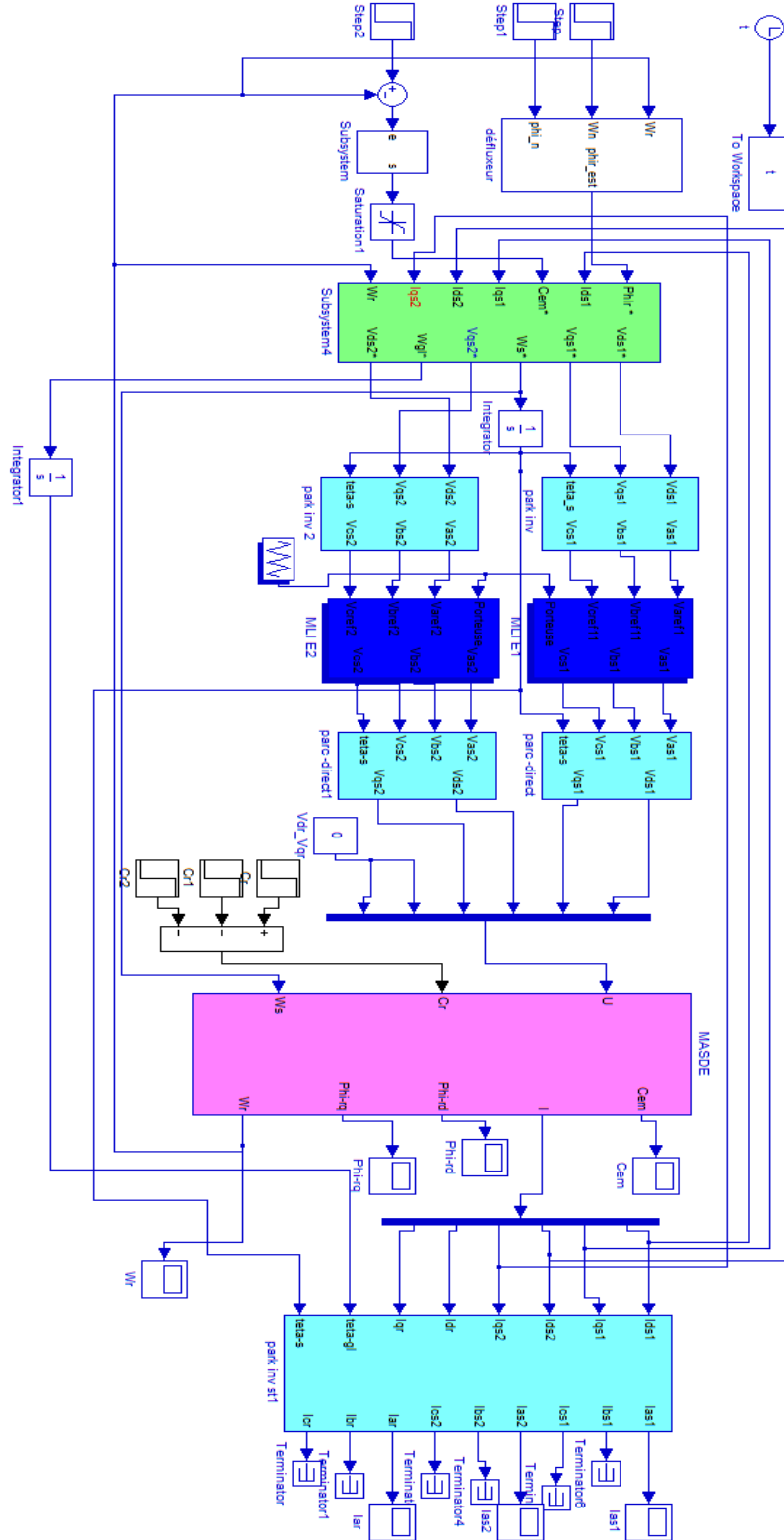
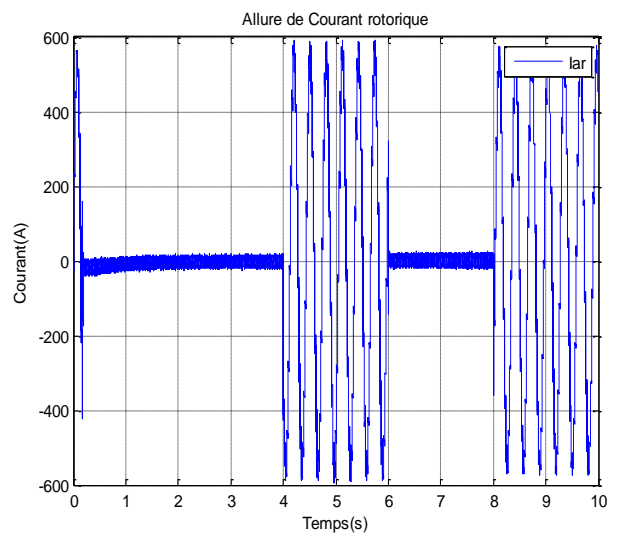
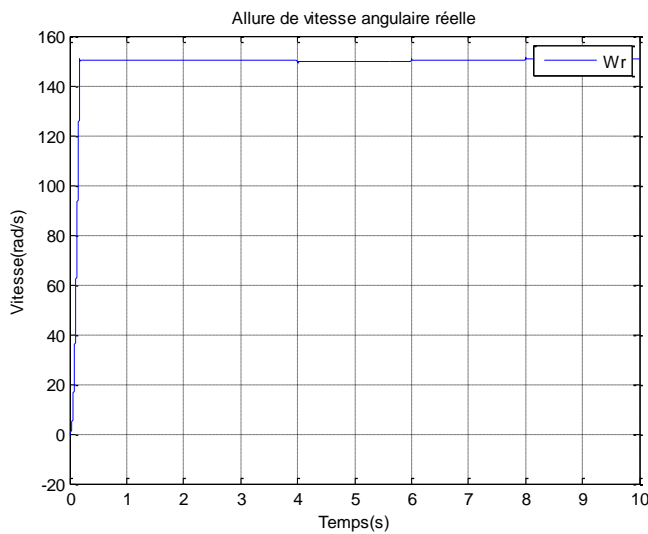
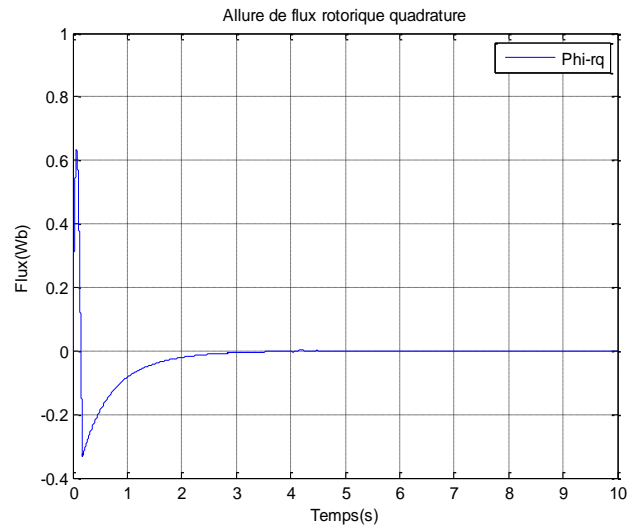
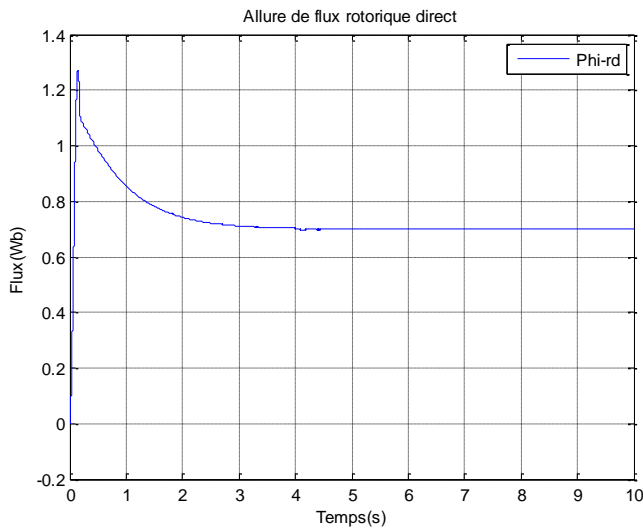
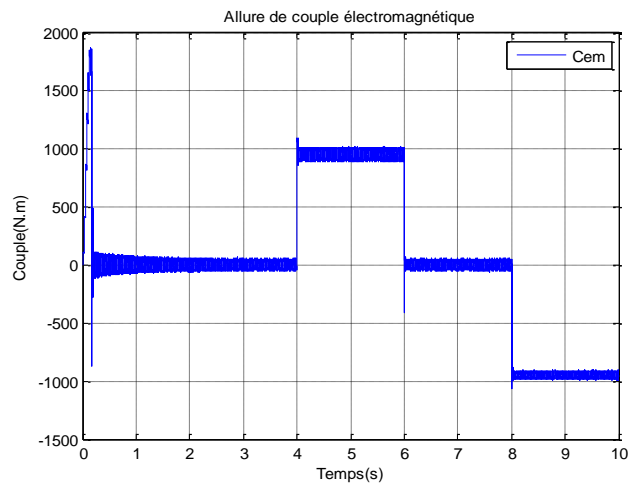
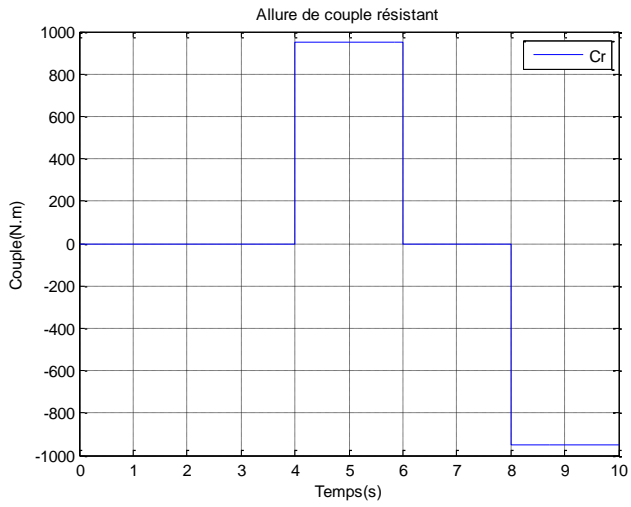


Figure IV.2 : Schéma bloc de la commande indirecte par orientation de flux de la MASDE

# Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

## IV.7.2 Résultats de la simulation



# Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

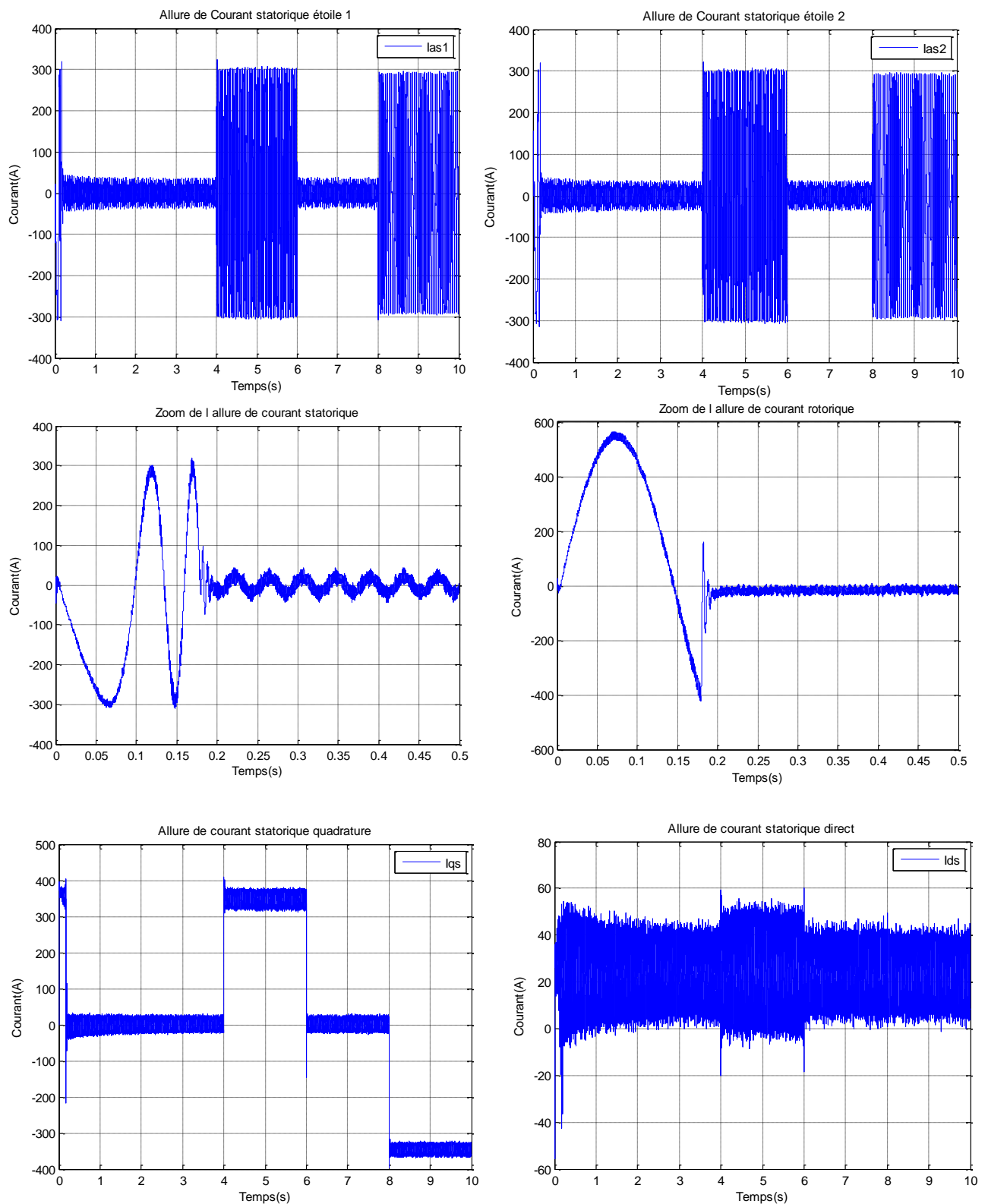


Figure IV.2 : Résultats de la commande indirecte par orientation de flux de la MASDE

## Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile

---

### IV.7.3 Interprétation des résultats de la simulation de la commande

La figure (IV.3) représente l'évolution des caractéristiques de la MASDE avec la régulation de vitesse par la méthode indirecte par orientation de flux rotorique. Avec l'application des charges suivantes :  $C_r = 950 \text{ N.m}$  entre l'intervalle de temps  $t = [4, 6]$ s et  $C_r = -950 \text{ N.m}$  entre l'intervalle de temps  $[8 \text{ } 10]$  avec une vitesse de rotation de  $N = 1500 \text{ tr/min}(157\text{rad/s})$ .

Les résultats de simulations montrent que les grandeurs asservis ont bien suivis leur consigne.

La variation du couple résistant n'influe pas sur la vitesse de la MASDE et reste toujours sur sa consigne par contre le couple électromagnétique suit la variation du couple résistant. Et les courant statorique en quadrature suivent la variation du couple électromagnétique. Ces courants statoriques (étoiles 1 et étoile 2) observent un courant d'appel d'environ 2 fois le courant nominal, et durant le régime permanent ils évoluent d'une manière sinusoïdale

Cependant, l'application de la charge positive, la tension et le courant statorique sont presque en phase et de même signe, ce qui veut dire que la puissance est de signe positif donc la machine absorbe des puissances actives et réactives de la source pour l'alimentation de la charge et pour sa magnétisation. Et à l'application de la charge négative, le courant est décalé par rapport à la tension, ça veut dire que le produit du courant et de la tension est négatif, donc la machine fournie de la puissance active à la source et absorbe une portion de la puissance réactive pour sa magnétisation.

Pendant le régime permanent, le flux rotorique direct suit sa valeur de consigne ( $0.7 \text{ Wb}$ ) et le flux en quadrature s'annule, donc le découplage est réalisé avec succès. Qui prouvant ainsi que l'orientation du flux suivant un seul axe. Par conséquent l'objectif de la commande est atteint.

La commande vectorielle a permis de contrôler les grandeurs mécanique de la machine ( $C_{em}$  et  $\Omega$ ). Donc le contrôle traduit par un suivi des consignes imposées avec une erreur acceptable.

## **Chapitre IV : Commande vectorielle de la machine asynchrone double étoile**

---

### **IV.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande vectorielle par orientation de flux rotorique à la machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique. L'objectif principal étant le meilleur contrôle de la réponse du couple et de la vitesse.

Dans ce contexte nous avons présenté tout d'abord un rappel théorique sur la commande vectorielle par orientation de flux rotorique, nous avons ensuite implanté un régulateur de vitesse PI, puis nous avons appliqué cette commande à la MASDE, et enfin les résultats de simulation sont présentés et commentés.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Notre recherche a été consacrée à l'étude d'une machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique, ainsi son fonctionnement à base d'une source hybride tout électrique dans le contexte d'une solution stratégique pour affronter l'un des plus grands défis de notre avenir énergétique : l'impact des transports sur l'environnement.

En premier lieu, nous nous sommes prêtés à la présentation des généralités sur les véhicules électriques, en citant les différents enjeux actuels sur le contexte économique et écologique.

En deuxième lieu, nous avons modélisés les différents éléments de la chaîne de traction, à savoir la source hybride, l'onduleur triphasé à deux niveaux enfin la machine asynchrone double étoile.

En troisième lieu, nous avons élaboré les blocs des différents éléments de la chaîne de traction, à savoir la source hybride, l'onduleur triphasé à deux niveaux, la machine asynchrone double étoile ainsi l'interprétation des résultats de simulation obtenus.

En quatrième lieu, nous avons élaboré le bloc de commande FOC associé à la machine asynchrone double étoile. Les résultats de simulation obtenus ont mené à l'introduction du régulateur de vitesse pour un contrôle meilleur de la réponse du couple et de la vitesse.

Le système de traction a été modélisé, simulé et une commande vectorielle a été appliqué à une machine asynchrone double étoile dédiée à un véhicule électrique. Les résultats de simulation montrent que cette technique de contrôle utilisé a pu minimiser les ondulations du couple et l'erreur statique de la vitesse.

D'après les résultats obtenus, des perspectives de recherches et de réalisations pratiques intéressantes sont envisageables dans le but d'améliorer le fonctionnement du véhicule électrique à base d'une machine asynchrone double étoile, nous proposons ce qui suit :

- Remplacement des onduleurs par des convertisseurs matriciels ;
- Utilisation des onduleurs multi-niveaux ;
- Minimiser les pertes par oscillation du couple électromagnétique ;
- Améliorer la gestion d'énergie en considération la décharge de la batterie, avec des générateurs photovoltaïques.

## Références Bibliographiques

---

- [1]C.C.CHAN and K.T.CHAU, « Modern Electric vehicle Technology». Oxford University Press INC, New York, 10/11/2001, ISBN10:0198504160.
- [2]Agence Internationale de l'énergie (IEA), « véhicule électrique : Technologie, performance et perspectives», Edition TECHNIP, Paris, France, 1994.
- [3]THOMAS HSAIN. « La voiture électrique : son histoire, ses échecs et son avenir», Edgekorp Publishing. New York 10010 Etats Unis. janvier 2012.
- [4]GEORGE GRALL. « La voiture électrique peut-elle sauver le monde ». PREMIERE PARTIE, LA REALITE, 2011.
- [5]T.MAHE, « Motorisations hybride : Que faire?, Industrie et Technologie ». nr868, mai 2005.
- [6]MICHEL WASTRAETE, «véhicule électrique et hybrides », dossier technique, du groupement national de la formation automobile, 2014.
- [7]DIAL MAHAM AMADOU, «Véhicule électrique fonctionnement à base d'une machine asynchrone double étoile », Mémoire de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, Juin 2018.
- [8]R. SCHMITZ Travail de maturité « La voiture électrique comme alternative réaliste à la voiture à essence »,2007.
- [9]PIERRE CAILLARD. « Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique ». ECOLE CENTRALE LILLE, Thèse Doctorat, 2015.
- [10]J.BERNAR, « Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et Stratégies de commande », Thèse de Doctorat, l'université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, décembre 2007.
- [11]N.JANIANUD, «Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l'optimisation de l'autonomie des performances et des coûts associés », Thèse de doctorat, école e formation supérieur supléc, 2011.

## Références Bibliographiques

---

- [12]MEZIANI SIF EDDINE, « contrôle par logique floue de traction d'un véhicule électrique basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, 2013.
- [13]F.DEFLOSSE, « Détermination de l'état de charge des batterie d'un véhicule électrique », Ingénieur, Université LIEGE, France, 1998.
- [14]N.BRAHMI et Z. CHANOUN, « Introduction des machines asynchrone double alimentation dans les véhicules électriques », Mémoire de fin de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, Juin 2012.
- [15]NEFATI AHMED, « Stratégie de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybrides », Thèse Doctorat, Université de PAUL SABATIER, Toulouse 3, 2013.
- [16]GHNNOUM RAMI, «pile à combustible », Mémoire de Magister, Université LIBANAISE, 2012.
- [17]N .KHALIL, « Stratégie de commande et technique intelligentes appliquées aux machines de type synchrone », Thèse Doctorat, Université MENTOURI, Constantine, 2010.
- [18]L'OBSERVATOIRE CETELEM, « le système de voiture électrique », OBSERVATOIRE AUTO, 2019 MD.
- [19]S. TASZKA et S. DOMERGUE, « Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques Les voitures », France, 2017.
- [20]I. BAADJI, « Optimisation de la commande d'un variateur de vitesse à base d'une pile PEMFC », Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf-Msila, 2014.
- [21]G. CRELLET, G. CLERC, *Actionneurs électriques*, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.



## Références Bibliographiques

---

- [22]D.BORDJAH et H.BENTARA, « contrôle flou-mode glissant d'un moteur asynchrone double étoile », Mémoire Master, Université A.MIRA-BEJAIA, 2018.
- [23]N.ACHAT, « Etude et Simulation de la Machine Asynchrone Double Etoile dans le repère abc en modes Normal et Dégradé », Mémoire de Master, Université A.MIRA-BEJAIA, 2018.
- [24]F.BERRABAH, « COMMANDE SANS CAPTEUR DE LA MACHINE ASYNCHRONE », Thèse Doctorat, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2016.
- [25]D.HADIOUCHE, « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure», Thèse Doctorat, Université HENRI POINCARÉ, Nancy-I, 2001.
- [26]D.BOUAMRA et N.BEDDI, « Etude d'une machine asynchrone double étoile (modélisation et commande), Mémoire de Master, université d'el oued, 2014.
- [27]R.ABDESSEMED, «Modélisation et simulation des machines électriques», Editeur : Ellipses Marketing, 2011.
- [28]KH.SLAOUTI et N. MAKHLOUFI, « Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile alimentée par Convertisseurs Matriciels Indirects », Mémoire de Magister, Université A.MIRA-BEJAIA, 2012.
- [29]H.AMIMEUR, « Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement», Mémoire Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2008.
- .
- [30]A.BOUKHELIFA, « Les éléments d'optimisation du pilotage d'une machine asynchrone en vue en vue d'un contrôle vectoriel », l'École Nationale Polytechnique, 2007.
- [31]K.HAMITOUCHE, « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne de traction ferroviaire », », Mémoire de Magister, Université A.MIRA-BEJAIA, 2013.
- [32] M.BOUDI AF, « Etude et contrôle de la machine asynchrone double étoile », Mémoire de Magister, Université de M'SILA, 2013.

## Annexes

### A. Paramètres utilisés

Tableau 1 : Eléments du cahier des charges d'un Véhicule électrique

Paramètres	Valeurs
Masse du véhicule	$m = 1300 \text{ kg}$
Rayon de la roue	$r = 0.32 \text{ m}$
Surface frontale du véhicule	$A_f = 2.6 \text{ m}^2$
Constante de la force de résistance due au déplacement	$f_{r0} = 0.01$
Densité de l'air	$\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$
Coefficients de traînée aérodynamique	$C_d = 0.32$
Machine utilisée	MASDE

Tableau 2 : Paramètre de la machine asynchrone double étoile

Tension nominale	$U_n = 220/380 \text{ V}$
Courant nominale	$I_n = 90 \text{ A}$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Moment d'inertie	$J = 2.5 \text{ kg m}^2$
Coefficient de frottement	$k_f = 0.04 \text{ Nms/rad}$
Fréquence nominale	$F = 50 \text{ Hz}$
Résistance rotorique	$R_r = 0.021 \Omega$
Résistance des enroulements de l'étoile 1	$R_{s1} = 0.071 \Omega$
Résistance des enroulements de l'étoile 2	$R_{s2} = 0.071 \Omega$
Inductances de fuites des enroulements de l'étoile 1	$L_{s1} = 0.0007 \text{ H}$
Inductances de fuites des enroulements de l'étoile 2	$L_{s2} = 0.0007 \text{ H}$
Inductance rotorique	$L_r = 0.000335 \text{ H}$
Inductance mutuelle cyclique	$L_m = 0.0151 \text{ H}$

## Annexes

Tableau 3 : Paramètres de la batterie

Paramètres	Valeurs
$R_{batt}$	$0.4 \Omega$
$C_{batt}$	$10 \text{ mF}$
$I_{batt}$	$5 \text{ A}$
T	$25^\circ\text{C}$

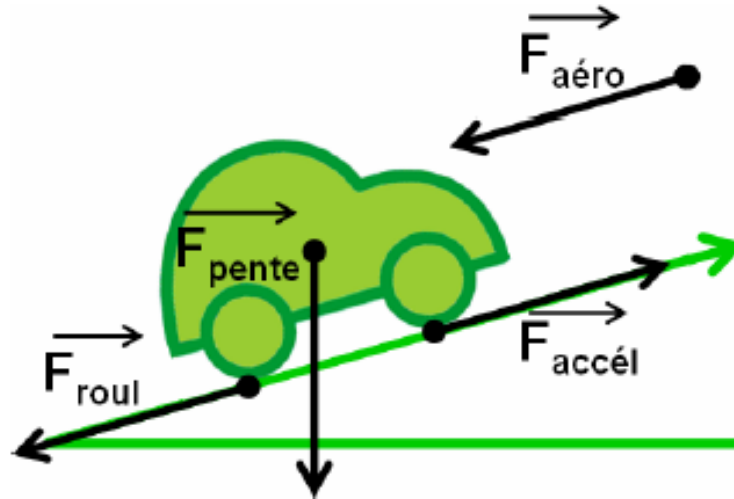
Tableau 4 : Paramètres du super condensateur

Paramètres	Valeurs
Rayon moléculaire	$r = 10^{-9} \text{ m}$
Coefficient de transfert de charge	$\alpha = 0.3$
Permittivité du matériau	$\varepsilon = 6.0208 \cdot 10^{-10} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Permittivité de l'espace	$\varepsilon_0 = 8.85418 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Résistance interne	$R_s = 22 \text{e-}4 \Omega$
Coefficient des pertes	$C_f = 0.95$
Température de fonctionnement	$T_{sc} = 25^\circ\text{C}$

Tableau 5 : Paramètres de la pile à combustible PIEMFC

Constantes pour stimuler la surtension d'activation	$A = 16$ $B = 0.0016 \text{ A}^{-1}$ $C = 0.0136 \text{ V}$
Constante de Faraday	$F = 96485.33 \text{ C/mol}$
Constante de temps d'hydrogène	$\tau_{H_2} = 3.37 \text{ s}$
Constante de temps d'oxygène	$\tau_{O_2} = 6.74 \text{ s}$
Constante de temps de l'eau	$\tau_{H_2O} = 18.418 \text{ s}$
Résistance interne de la PAC	$R_{pac} = 0.003 \Omega$
température absolue	$T_{pac} = 303 \text{ K}$
Volume de l'anode	$V_{an} = 150 \text{ m}^3$
courant	$I_{pac} = 0.0009 \text{ A}$
La densité de courant maximal	$J_{max} = 0.6 \text{ A/cm}^2$

### B. Etude dimensionnelle



Figures. 1 : Représentation des forces agissant sur le véhicule électrique

Les différentes forces agissant sur le véhicule électrique avec une masse total  $m$ , en mouvement au long d'une pente sont représentées sur la figure 1.

Nous avons quatre principales forces :

- **Force résistante due à la pente à gravir ( $F_{slope}$ )** : elle est proportionnelle à la masse  $m$  du véhicule et dépend de la pente de la route. Son expression est :

$$F_{slope} = m g \sin(\beta)$$

- **Force résistante à la pénétration dans l'air ( $F_{aéro}$ )** : elle est engendrée par le frottement de l'air sur l'ensemble de la carcasse du véhicule en se déplaçant. Son expression est définie par :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_f C_d V_e^2$$

- **Force de résistance au roulement ( $F_{tire}$ )** : elle est due principalement à la friction des pneus du véhicule sur la route. Cette force agit dans le sens opposé du déplacement du véhicule. Sa relation est donnée par :

$$F_{tire} = m g f_{ro} \cos(\beta)$$

- **Poids** : elle est liée à la pente de la route. Son expression est :  $P = m \cdot g$

## Annexes

---

Avec :

$m$  : La masse totale du véhicule en 'kg' ;

$g$  : La gravité en 'm/s<sup>2</sup>' ;

$f_{ro}$  : La constante de la force de résistance due au déplacement ;

$\rho_{air}$  : La densité de l'air en 'kg/m<sup>3</sup>' ;

$A_f$  : La surface frontale du véhicule 'm<sup>2</sup>' ;

$C_d$  : Le coefficient de traînée aérodynamique ;

$V_e$  : La vitesse du véhicule en 'm/s' ;

$\beta$  : L'angle de pente de la route en 'rad'.

La formule de la force résistive totale est :

$$F_r = F_{aero} + F_{tire} + F_{slope}$$

Le moteur électrique assure la force de traction du véhicule ' $F$ ' électrique. L'équation du mouvement est alors donné par :

$$m \frac{dV_e}{dt} = F - F_r$$

La force ( $F - F_r$ ) accélère (respectivement décélère) le véhicule si la différence est positive (respectivement négative).

La puissance mécanique du véhicule électrique est donnée par l'expression suivante :

$$P_v = F_r \cdot V_e$$

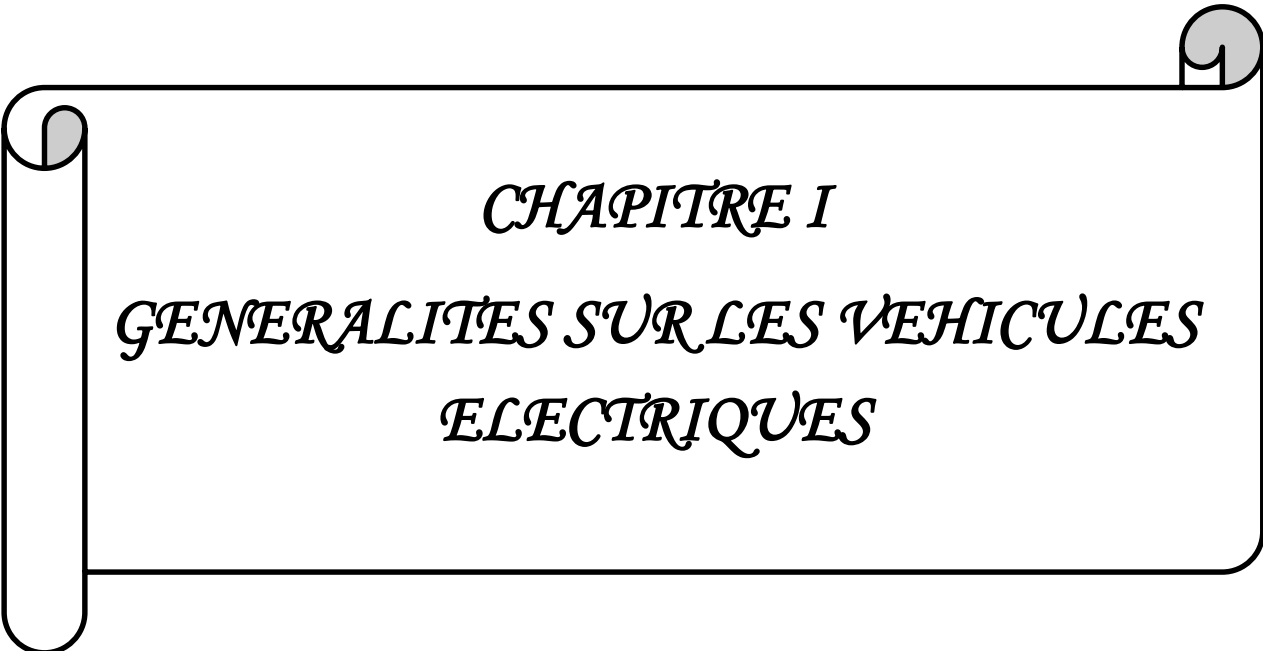
En fin, le couple résistant du véhicule est donnée par :

$$T_r = F_r \frac{r}{G}$$

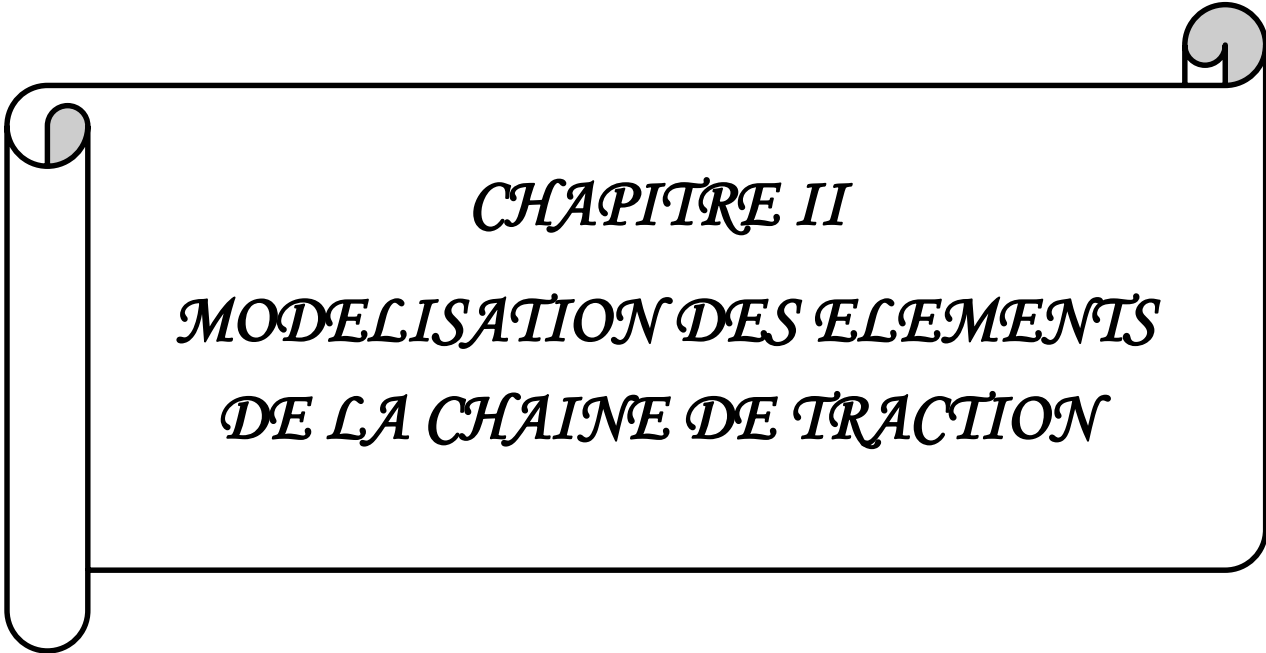
Où «  $r$  » est le rayon de la roue et «  $G$  » représentent le gain du réducteur qui relie le moteur à l'axe.



*INTRODUCTION GENERALE*

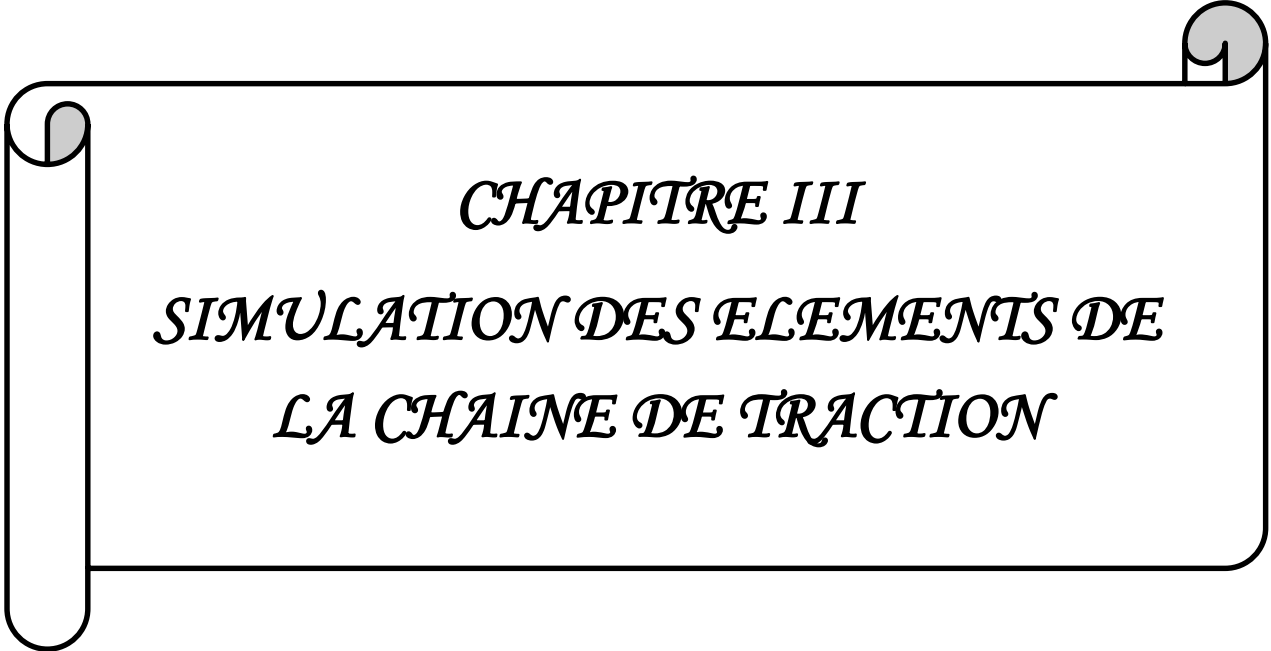


*CHAPITRE I*  
*GENERALITES SUR LES VEHICULES*  
*ELECTRIQUES*



*CHAPITRE II*  
*MODELISATION DES ELEMENTS*  
*DE LA CHAINE DE TRACTION*





*CHAPITRE III*  
*SIMULATION DES ELEMENTS DE*  
*LA CHAINE DE TRACTION*



*CHAPITRE IV*

*COMMANDE VECTORIELLE DE LA  
MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE  
ETOILE*



*CONCLUSION GENERALE*