

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

# MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :  
**Énergies Renouvelables**  
*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

Intitulé :

---

## MODELISATION ET SIMULATION D'UN VEHICULE ELECTRIQUE ALIMENTE PAR UNE PILE A COMBUSTIBLE

---

Présenté par :

- BENSLIMANE Abouamama
- BERREGHIOUA Dahmane
- DERBAL Abderrahmane

*Soutenu le : 02/07/2020 devant le Jury :*

<i>M. BRAHIMI Mohammed</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. BENMOHAMED Fayssal</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. HABCHI Yacine</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>



*À la mémoire de mes grands-mères et mes grands-pères*

*à mes parents,*

*à mon frère et mes sœurs,*

*à toute ma famille,*

*à mes amis,*

*à tous ceux que j'aime.*

*à ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études,*

*je dédie ce mémoire.*



**BENSLIMANE ABOUAMAMA**

---



*A mes parents chéris*

*des larmes de gratitude*

*Pour leur loyauté prodigue*

*à mes deux sœurs et mes deux frères*

*avec toute mon affection.*

*à mes tantes et oncles.*

*à tous mes amis.*

*à tous ceux que j'aime.*

*Je dédie ce modeste travail.*

**BERREGHIOUA DAHMANE**

*Je dédie ce mémoire :*

*à toute ma famille ,et à mon amis ZAHAL Islam.*

*à tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir.*

*à tous ceux dont les noms m'ont échappé.*

**DERBALE ABDERRAHMANE**



*Au nom du DIEU le clément et le  
miséricordieux  
Remerciements*

*Nous sommes très honoré de vous adresser nos sincères remerciements et du fond du cœur pour votre aide à la première œuvre au sein de ma respectable université, notamment la Faculté des sciences Exactes, département génie mécanique Université de Bechar, où ont à passé cinq années d'études d'ingénieur et l'expérience que ont à acquis durant cette période.*

*Et ou deuxième œuvre au centre Universitaire de Naâma, aux nous avons passé une année inoubliable pour obtention d'un diplôme de Master 2. Un remerciement spécial à notre promoteur Monsieur **BENMOHAMED FAYSSAL** pour son aide, son encadrement très professionnel, son suivi et ses bons conseils ainsi que son orientation objective quant à la rédaction de ce mémoire.*

*Un grand remerciement aussi, à Monsieur **TAIBI Bouziane**, qui nous a encouragé de poursuivre nos études.*

*Nous remercions également au passage tous ceux qui nous aidé de près ou de loin matériellement ou par des conseils surtout mes parents à leur tête **ma mère** qui m'a toujours soutenu même durant les périodes difficiles et ce depuis ma première scolarité c'est-à-dire du primaire jusqu'à l'université et qui n'a ménagé aucun effort pour ma réussite dans ce domaine que j'ai choisi et que j'ai toujours chéri ! ...*

*Un vif remerciement aussi à tous les professeurs d'université de Bechar, notamment Messieurs **BOUSARHANE Ismail.K**, **OTMANI A /khalek** et **BEKRI A/kadeur** qui nous ont toujours orientés à davantage d'efforts pour la réussite, et surtout pour leur disponibilité et leur précieux conseils.*

*A tous nos collègues de la promotion de Master 2 énergie renouvelable, Spécialement Mr: Ait Abdellah Kamel.*

*Et enfin, nous sommes très reconnaissant que notre présence au sein du centre universitaire de Naâma et au sein d'université de Béchar durant les années d'études qui ont nettement enrichi et élargi nos connaissances professionnelles et intellectuelles, et nous ne ménagerons aucun effort à l'avenir pour les mettre au service de notre pays, de nos collègues d'études et à l'ensemble des étudiants intéressés par la recherche et le développement de leurs connaissances dans tous les domaines, et plus particulièrement la branche électrotechnique, l'arme des générations ....*

---

## Sommaire

Liste des Figures.....	iv
Liste des Tableaux.....	v
Nomenclature .....	vi
Liste des Abréviations.....	viii
Résumé.....	ix
Introduction générale .....	3
<b>Chapitre I : Etat de l'art "VE" .....</b>	<b>5</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Le Véhicule Electrique .....</b>	<b>5</b>
<i>I.2.1 Bref Historique du Véhicule Electrique .....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.2 Véhicule d'aujourd'hui.....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.3 Les points faibles du VE.....</i>	<i>8</i>
<b>I.3 La traction électrique .....</b>	<b>9</b>
<i>I.3.1 Représentation de la chaîne de traction.....</i>	<i>9</i>
<i>I.3.2 Architecture de motorisation.....</i>	<i>11</i>
<i>I.3.3 Motorisation pour la chaîne de traction .....</i>	<i>12</i>
<i>I.3.4 Choix du moteur de traction.....</i>	<i>14</i>
<i>I.3.5 Convertisseur statique.....</i>	<i>14</i>
<i>I.3.6 Contrôle électronique.....</i>	<i>15</i>
<i>I.3.7 Transmission mécanique .....</i>	<i>15</i>
<b>I.4 Sources d'énergie.....</b>	<b>15</b>
<i>I.4.1 Batteries.....</i>	<i>16</i>
<i>I.4.2 Pile à combustible .....</i>	<i>16</i>
<b>I.5 Conclusion .....</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre II : Modélisation de la Chaîne de Traction Électrique.....</b>	<b>17</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>II.2 Modélisation des éléments de la chaîne de traction.....</b>	<b>18</b>
<i>II.2.1 La chaîne de traction asynchrone .....</i>	<i>18</i>
<i>II.2.2 Constitution et principe de fonctionnement du moteur Asynchrone .....</i>	<i>18</i>
<i>II.2.3 Modélisation de la machine asynchrone .....</i>	<i>21</i>
<i>II.2.4 Modèle de Park .....</i>	<i>23</i>
<i>II.2.5 Model d'état de la machine asynchrone.....</i>	<i>27</i>
<i>II.2.6 Simulation numérique dans un référentiel lié au champ tournant.....</i>	<i>27</i>

<b>II.3</b>	<b>Modélisation du convertisseur statique .....</b>	<b>28</b>
II.3.1	<i>Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension.....</i>	29
II.3.2	<i>Principes des stratégies de la commande MLI.....</i>	30
II.3.3	<i>Resultat de Simulation de MAS avec Onduleur MLI : .....</i>	34
<b>II.4</b>	<b>Différentiel mécanique .....</b>	<b>35</b>
II.4.1	<i>Description.....</i>	36
II.4.2	<i>Fonctionnement.....</i>	36
<b>II.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>38</b>
<b>Chapitre III : Étude de la commande vectorielle d'une roue motrice.....</b>		<b>39</b>
<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>39</b>
<b>III.2</b>	<b>Principe de la commande vectorielle.....</b>	<b>39</b>
III.2.1	<i>Equations dans le repère d-q.....</i>	40
III.2.2	<i>Commande vectorielle indirecte ( IFOC ).....</i>	42
III.2.3	<i>Découplage par compensation classique .....</i>	43
III.2.4	<i>Calcul des régulateurs de courant et de vitesse .....</i>	45
III.2.5	<i>Réglage de vitesse de la MAS par la commande vectorielle indirecte .....</i>	48
<b>III.3</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>52</b>
<b>Chapitre IV : Modélisation de la Pile à combustible type PEMFC.....</b>		<b>53</b>
<b>IV.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.2</b>	<b>Historique .....</b>	<b>53</b>
<b>IV.3</b>	<b>Principe de fonctionnement.....</b>	<b>54</b>
<b>IV.4</b>	<b>Classification des technologies de piles à combustible.....</b>	<b>55</b>
<b>IV.5</b>	<b>Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC).....</b>	<b>56</b>
<b>IV.6</b>	<b>Constitution d'une pile à combustible.....</b>	<b>56</b>
IV.6.1	<i>Caractéristique électrique :.....</i>	57
<b>IV.7</b>	<b>Les applications des piles à combustible.....</b>	<b>58</b>
IV.7.1	<i>Automobile.....</i>	58
IV.7.2	<i>Stationnaires.....</i>	58
IV.7.3	<i>Maritimes.....</i>	58
IV.7.4	<i>Portables .....</i>	58
<b>IV.8</b>	<b>Modélisation de la PEMFC .....</b>	<b>59</b>
IV.8.1	<i>Modèle de tension.....</i>	59
IV.8.2	<i>Tension de Nernst :.....</i>	59
IV.8.3	<i>Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics) .....</i>	60

IV.8.4	<i>Polarisation ohmique</i> .....	60
IV.8.5	<i>Polarisation de concentration (Mass Transport)</i> .....	61
IV.8.6	<i>Model final de tension</i> .....	61
<b>IV.9</b>	<b>Dimensionnement du stack Pile à Combustible</b> .....	<b>63</b>
IV.9.1	<i>Détermination du nombre de cellules.</i> .....	63
IV.9.2	<i>Détermination de la surface des cellules</i> .....	64
<b>IV.10</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>64</b>
<b>Chapitre V :</b>	<b>Simulation et commande d'une chaîne de tractions bimoteurs</b> .....	<b>65</b>
<b>V.1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>65</b>
<b>V.2</b>	<b>Modélisation de la partie mécanique de la chaîne de traction électrique</b> .....	<b>65</b>
V.2.1	<i>Charge véhicule</i> .....	66
V.2.2	<i>modèle du réducteur</i> .....	68
V.2.3	<i>Modélisation du véhicule électrique</i> .....	70
V.2.4	<i>Différentiel électronique</i> .....	73
V.2.5	<i>Commande de roues motrices d'un véhicule électrique</i> .....	74
<b>V.3</b>	<b>Résultats de simulation</b> .....	<b>77</b>
V.3.1	<i>Mouvements du véhicule en ligne droite avec vitesse de 60 km/h</i> .....	79
V.3.2	<i>Mouvements du véhicule en Rampe de 10% et vitesse de 60 km/h</i> .....	81
V.3.3	<i>Mouvement en virage à gauche à vitesse de 60 km/h</i> .....	82
V.3.4	<i>Terrain plat et échelon de vitesse</i> .....	84
<b>V.4</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>85</b>
<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>86</b>	
<b>Annexe</b> .....	<b>87</b>	
<b>Bibliographié</b> .....	<b>89</b>	

## Liste des Figures

<b>Figure I-1</b> : Exemple de réalisation « La Jamais contente » en 1899 [6] .....	6
<b>Figure I-2</b> : Classification des différentes chaînes de traction hybride. ....	7
<b>Figure I-3</b> : Schéma synoptique d'une chaîne de traction. ....	10
<b>Figure I-4</b> : Caractéristiques couple/vitesse du moteur électrique et du moteur thermique. ....	10
<b>Figure I-5</b> : Architecture de motorisation (Monomoteur).....	11
<b>Figure I-6</b> : Architecture de motorisation (Multi-moteur).....	11
<b>Figure I-7</b> : Moteur roue. ....	12
<b>Figure II-1</b> : Chaîne de traction asynchrone. ....	18
<b>Figure II-2</b> : Machine asynchrone à bagues. ....	19
<b>Figure II-3</b> : Rotor d'une machine asynchrone à cage. ....	19
<b>Figure II-4</b> : Représentation schématique du circuit rotoriques et statoriques d'une machine asynchrone triphasée .....	21
<b>Figure II-5</b> : système triphasé (Oabc) et diphasé (Odq) .....	24
<b>Figure II-6</b> : Comportement dynamique de la MAS alimenté par une alimentation parfaite.....	28
<b>Figure II-7</b> : Schéma de principe de l'onduleur à MLI.....	29
<b>Figure II-8</b> : Principe de la modulation 'sinus_triangle'. ....	33
<b>Figure II-9</b> : Signaux de commande. ....	33
<b>Figure II-10</b> : Résultat de simulation de l'onduleur à commande MLI.....	34
<b>Figure II-11</b> : Association de l'onduleur MLI avec la MAS .....	34
<b>Figure II-12</b> : Comportement dynamique de la MAS alimenté par onduleur MLI. ....	35
<b>Figure II-13</b> : Schéma de principe d'un différentiel mécanique .....	36
<b>Figure II-14</b> : Fonctionnement du différentiel.....	37
<b>Figure III-1</b> : Principe d'orientation du flux rotorique .....	40
<b>Figure III-2</b> : Découplage par compensation classique.....	44
<b>Figure III-3</b> : Schéma de principe de la commande vectorielle indirecte. ....	44
<b>Figure III-4</b> : Schéma de régulation du courant .....	46
<b>Figure III-5</b> : Schéma bloc de régulation du la vitesse.....	47
<b>Figure III-6</b> : Schéma de principe de la commande vectorielle indirecte d'une MAS.....	48
<b>Figure III-7</b> : Résultats de simulation de test de découplage de l'orientation du flux rotorique par la méthode indirecte.....	49
<b>Figure III-8</b> : Résultat de simulation de la commande en vitesse de la MAS avec onduleur parfait (Application d'un couple de pente et inversement de sens de rotation ). ....	50
<b>Figure III-9</b> : Résultat de simulation de la commande en vitesse de la MAS avec onduleur MLI (Application d'un couple de pente et inversement de sens de rotation ). ....	51
<b>Figure IV-1</b> : Principe de fonctionnement.....	54
<b>Figure IV-2</b> : Schéma d'une zone active de cellule de pile à combustible H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> .....	54
<b>Figure IV-3</b> : Stack d'une pile à combustible.....	56
<b>Figure IV-4</b> : Structure d'un empilement des cellules PEMFC.....	57
<b>Figure IV-5</b> : Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible .....	57
<b>Figure IV-6</b> : Véhicule équipée d'une pile à combustible.....	58
<b>Figure IV-7</b> : Un système à pile à combustible utilisé pour un téléphone portable.....	58
<b>Figure IV-8</b> : modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC) .....	61
<b>Figure IV-9</b> : Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par cellule) .....	61



<b>Figure IV-10</b> : Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (tension par cellule) .....	62
<b>Figure IV-11</b> : Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par cellule) .....	62
<b>Figure IV-12</b> : Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (tension par cellule) .....	63
<b>Figure V-1</b> : Partie mécanique de la chaîne de traction électrique. ....	65
<b>Figure V-2</b> : Schéma électrique équivalent de la charge véhicule.....	66
<b>Figure V-3</b> : Couple de résistance au roulement.....	67
<b>Figure V-4</b> : Couples résistants à l'avancement de véhicule .....	69
<b>Figure V-5</b> : Géométrie du véhicule .....	70
<b>Figure V-6</b> : Transmission complète avec les deux moteurs- roues.....	74
<b>Figure V-7</b> : Représentation énergétique macroscopique du différentiel électronique. ....	75
<b>Figure V-8</b> : Schéma générale de la commande de roues motrices. ....	76
<b>Figure V-9</b> : Résultat de simulation mouvements du véhicule avec onduleur parfait (mouvement en ligne droite ,application d'un couple de pente et échelon de vitesse )......	78
<b>Figure V-10</b> : Résultat de simulation mouvements du véhicule avec onduleur MLI (mouvement en ligne droite ,application d'un couple de pente et échelon de vitesse )......	79
<b>Figure V-11</b> : Résultat de simulation en mouvement ligne droite avec onduleur parfait .....	80
<b>Figure V-12</b> : Résultat de simulation en mouvement ligne droite avec onduleur MLI .....	80
<b>Figure V-13</b> : Résultat de simulation mouvement en rampe 10% avec onduleur parfait .....	81
<b>Figure V-14</b> : Résultat de simulation mouvement en rampe 10% avec onduleur MLI .....	82
<b>Figure V-15</b> : Résultat de simulation mouvement en virage à gauche avec onduleur parfait .....	83
<b>Figure V-16</b> : Résultat de simulation mouvement en virage à gauche avec onduleur MLI .....	83
<b>Figure V-17</b> : Résultat de simulation mouvement en échelon de vitesse avec onduleur parfait .....	84
<b>Figure V-18</b> : Résultat de simulation mouvement en échelon de vitesse avec onduleur parfait .....	85

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I-1</b> : Comparaison des différents Moteurs [29]. ....	14
<b>Tableau IV-1</b> : Les types des piles à combustibles.....	55
<b>Tableau V-1</b> : Paramètres géométriques du véhicule (29,30,33).....	71

# Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
d et q	: Axes direct et en quadratique	—
$x_d$ et $x_q$	: Composantes de la grandeur $x$ dans le repère (d-q)	—
$\phi$	: Flux	[Wb]
$\omega^*$	: Vitesse de référence	[rad/sec]
$\omega_s$ et $\omega$	: Vitesses angulaires électriques statorique et rotorique	[rad/sec]
$\Omega_m$	: Vitesse mécanique	[rad/sec]
$\theta_s$ et $\theta$	: Angle électrique statorique et rotorique	[rad]
$C_{em}$ , $C_r$ et $C_{ch}$	: Couple électromagnétique, Couple résistant et couple de charge	[N.m]
$e$	: Ecart entre la vitesse $\omega$ et $\omega^*$	[rad/sec]
$V$	: Tension	[V]
$I$	: Courant	[A]
$f_m$ et $f_p$	: Fréquence de l'onde de référence et Fréquence de l'onde porteuse	[Hz]
$R_s$ et $R_r$	: Résistances statorique et rotorique.	[ $\Omega$ ]
$L_s$ et $L_r$	: Inductances statorique et rotorique	[H]
$L_m$	: Inductance mutuelle propre.	[H]
$f_c$	: Coefficient de frottement.	[N.m.sec/rad]
$J$	: Moment d'inertie	[kg/m <sup>2</sup> ]
$P$	: Nombre de paire de pôles	—
$s$	: Opérateur de LAPLACE	—
$k_i$	: Gain intégral du régulateur PI	—
$k_p$	: Gain proportionnel du régulateur PI	—
$\rho \cdot (-1 \pm j)$	: pôle désiré	—
$T_r$	: Constante du temps rotorique.	[sec]
$\mu(x)$	: Degré d'appartenance	—
$V_{s,a,b,c}$ et $V_{r,a,b,c}$	: Tensions de phases (stator et rotor)	[V]
$I_{s,a,b,c}$ et $I_{r,a,b,c}$	: Courants statoriques et rotoriques de phases	[A]
$V_{ds}$ et $V_{qs}$	: Tensions statoriques suivant les axes direct et en quadratique	[V]
$i_{ds}$ et $i_{qs}$	: Courants statoriques suivant les axes direct et en quadratique	[A]
$x^*$	: Grandeur de référence de la variable $x$	—
$\sigma$	: Coefficient de dispersion	—
$U_{eq}$	: Grandeur de commande équivalente	—
$U_n$	: Grandeur discontinue	—
$\Delta G$	: Le changement d'énergie libre	[ J /mol ]
$F$	: La constante de faraday (96,487).	[ C/Kmol ]
$\Delta S$	: Le changement d'entropie	[ J /mol ]
$R$	: La constante universelle du gaz (8,314)	[J/K.mol]

$P_{H_2}, P_{O_2}$	: sont respectivement les pressions partielles d'hydrogène et l'oxyg	[ atm ]
$T$	: La température de fonctionnement de la pile	[ K ]
$T_{ref}$	: La température de référence	[ K ]
$I_{stack}$	: Le courant de fonction de la pile	[ A ]
$J_{max}$	: La densité du courant limite	[ A/cm <sup>2</sup> ]
$P_{pile}$	: Puissance électrique brute du stack	[ W ]
$N$	: Nombre de cellules de l'empilement	—
$V_{Fc}$	: Tension par cellule	[ V ]
$J$	: Densité de courant	[ A/m <sup>2</sup> ]
$A$	: Surface active des cellules	[ m <sup>2</sup> ]
$M$	: Masse du véhicule	[ Kg ]
$R_r$	: Rayon d'une roue	[ m ]
$\rho$	: Masse volumique de l'air	[ Kg /m <sup>3</sup> ]
$S$	: Section de projection frontale	—
$C_x$	: Coefficient de pénétration dans l'air	—
$f_{rr}$	: Coefficient de résistance au roulement	[ N.m ]
$V_h$	: Vitesse linéaire du véhicule	[ Km/h ]
$\alpha$	: Angle de la pente	[ Rad ]
$J_v$	: Le moment d'inertie du véhicule	[ Kg/m <sup>2</sup> ]
$k_{aero}$	: Constante aérodynamique	—
$C_{max}$	: Couple de résistance au roulement maximal	[ N.m ]

# Liste des Abréviations

<b>VE</b>	: Véhicule Electrique .
<b>VEH</b>	: Véhicule Electrique Hybride .
<b>IEA</b>	: International Energy Agency.
<b>MAS</b>	: Machine Asynchrone .
<b>MLI</b>	: Modulation par Largeur d'Impulsion.
<b>IFOC</b>	: Indirect Field Oriented Control.
<b>DFOC</b>	: Direct Field Oriented Control.
<b>P.I</b>	: Régulateur Proportionnel Intégral.
<b>PEMFC</b>	: Proton Exchange Membrane Fuel Cell.
<b>EME</b>	: Electrode Membrane Electrode.

## Résumé

Dans ce mémoire, nous exposons la modélisation et la simulation d'un véhicule électrique alimentée par une pile à combustible avec deux roues motrices indépendantes et à *différentiel électrique* de vitesse.

Le travail présente la stratégie de commande vectorielle de roues lors des changements de la vitesse ou de la trajectoire géographiques du véhicule (pente et virage).

Ainsi, Il est strictement nécessaire d'étudier le système de commande pour avoir un contrôle de couple dans chaque roue motrice. Ceci permet un contrôle amélioré de traction et par conséquent l'optimisation de la stabilité et de la fiabilité du véhicule.

**Mots Clés** : Différentiel Electrique, Véhicule Electrique, Pile à combustible, Modèle dynamique, Modèle Cinématique.

## Abstract

In this thesis, we present the modeling and the simulation of an fuel cell vehicle with two front independent driving wheels developing the effect of *electric differential*.

The work presents the strategy of a field-oriented control which ensure the two driving wheels must turn perfectly while varied speed or changed geographic trajectory ( slope and curve) without skid of vehicle.

Thus, it is strictly necessary to study the control device to have a control of torque in each driving wheel. This allows an improved control of traction and by consequence optimization of stability and reliability of the vehicle.

**Key Words**: Electric differential, Electrical vehicle, fuel cell, Driving Wheel, Dynamic Model, Kinematic Model.

## ملخص

في هذه المذكرة نعرض نموذج محاكاة لمركبة كهربائية تشغل بخلية وقود هيدروجينية مزودة بعجلتين محركتين مستقلتين من الامام لتطویر فعل الميابين الكهربائي. هذا العمل يعرض استراتيجیة التحكم التي تتضمن وجوب دوران العجلتين بالسرعة المناسبة فور تغيير سرعة المركبة او تغير تضاريس المسار دون انحراف. كذلك من الضروري دراسة نظام التحكم لمراقبة عزم العجلة المحركة. هذا يسمح بمراقبة ملائمة للجر و بالنتيجة تحسين استقرار و توازن المركبة.

**كلمات مفتاحية**: الميابين الكهربائي، مركبة كهربائية، خلية وقود هيدروجينية، عجلة محرك، نموذج ديناميكي، نموذج حركي.

## **Introduction générale**

Dans le contexte énergétique actuel (Pénurie et pollution des énergies fossiles), l'automobile occupe l'univers quotidien de notre société. En effet, les pollutions sonores (acoustiques) et par gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation du carburant en constante augmentation, impliquant de plus en plus cet objet de consommation au cœur des débats autour de l'énergie.

Le véhicule électrique (VE) est l'une des solutions préconisées, par les constructeurs d'automobiles et les organismes de recherche, pour essayer de remplacer peu à peu les véhicules thermiques dans les centres villes où le facteur de pollution est notamment important, les contraintes environnementales et économiques ainsi que l'économie de l'énergie qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite le développement du véhicule électrique. La réussite dans ce domaine proviendra d'un subtil mélange entre une vision scientifique de haut niveau et une maîtrise de la technologie. Dans cette combinatoire, l'électricité jouera un rôle fondamental et contribuera à atteindre les nouveaux objectifs de l'automobile en termes d'économie d'énergie et d'environnement [1].

Beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions ont été d'ores et déjà proposées. Les voies de progrès mettent en exergue les procédés à base d'électricité à savoir : les véhicules électriques, hybrides et à pile à combustible. Lorsque ces véhicules sont purement électriques, leur usage rencontre des limitations liées à leur alimentation par batteries. En revanche, l'utilisation d'un véhicule hybride qui combine une motorisation électrique dans les zones urbaines et une motorisation thermique dans les zones rurales, apparaît comme une solution intermédiaire et une alternative intéressante. La pile à combustible, constitue une autre source d'énergie pour le VE. Néanmoins, beaucoup de progrès restent à faire en matière d'encombrement de poids et de stockage[2].

Les différentes parties concernant le présent mémoire font l'objet de Cinq chapitre structuré comme suit :

- Le premier chapitre est état de l'art "VE". Nous avons jugé utile d'introduire certaines notions sur les véhicules électriques en particulier les configurations de motorisation les plus employées actuellement. Des orientations générales, concernant leur optimisation et leurs critères de choix, sont également présentées. Ensuite, nous présentons les différents sources d'énergie.
- Le deuxième chapitre fera l'objet des rappels et des compléments indispensables concernant la modélisation des différents constituants de la chaîne de traction électriques, commençant par la machine asynchrone de type Leroy-sommer destinée à la traction électrique dans l'espace de Park associée par son onduleur de tension.
- Le troisième chapitre présentera la commande vectorielle de la machine asynchrone (IFOC), historique et principe de base de cette commande, avec le calcul des coefficients des régulateurs PI classique selon les placements des pôles. Différentes simulations sont effectuées afin de tester la robustesse de cette commande et voir l'effet des dérives paramétrique sur cette commande.

- Le quatrième chapitre concernera à la modélisation de la pile à combustible type PEMFC et leur principe de fonctionnement.
- Le cinquième chapitre présentera les structures de commande proposées pour la propulsion du véhicule électrique, en mettant en relief le principe du différentiel électrique commandé par le contrôle de la différence de vitesse des deux moteurs asynchrones qui remplace le différentiel mécanique conventionnel. Ensuite, on présentera la commande et la simulation du groupe motopropulseur sous l'environnement MATLAB® après un tel choix de la stratégie de la machine indépendante qui s'adopte bien au comportement du véhicule électrique urbain.
- Enfin, nous terminons par une conclusion générale rassemblant un certain nombre de remarques générales sur notre travail et des suggestions pour des développements futurs.

Chapitre I  
Etat de l'art  
“VE”



# Chapitre I : Etat de l'art "VE"

## I.1 Introduction

Depuis plusieurs années, la traction électrique devient un thème de recherche d'actualité. Ce concept englobe un large domaine à caractère pluridisciplinaire. Il fait appel à des connaissances en électrotechnique, électronique, mécanique, automatique, chimie, et informatique. La configuration classique d'une chaîne de traction électrique repose sur la commande d'une machine à courant continu ou à courant alternatif. En ce qui concerne la traction, une consigne de couple est appliquée. La chaîne doit comporter une source d'énergie, un ou des convertisseurs d'énergie, et une ou des machines électriques, associées à une électronique de calcul et d'instrumentation [3] et [4].

Dans ce chapitre, nous présentons un bref rappel sur les véhicules électriques en général et une description sommaire des différentes technologies qui y sont employées. Nous aborderons également le problème de la motorisation dite "tout électrique" et nous mettons en évidence les avantages et inconvénients des solutions mono et multi-moteurs ainsi que les exigences fonctionnelles de la chaîne de traction électrique. Enfin, en guise de conclusion, nous abordons le problème de l'optimisation de la chaîne de traction

## I.2 Le Véhicule Electrique

### I.2.1 Bref Historique du Véhicule Electrique

L'histoire du véhicule électrique a commencé au XIX siècle par la conception des premiers prototypes, allant du train miniature à la carriole. En 1865, la batterie rechargeable découverte par Gaston Planté, puis améliorée par Camille Faure en 1881, ont permis l'essor des voitures électriques [5] et [6].

Depuis quelques années, un regain d'intérêt est porté au véhicule électrique. Ce n'est pas la première fois que celui-ci est vu comme alternative ou complément aux véhicules thermiques (VTh). Ainsi, au cours des siècles derniers, le véhicule électrique n'a eu de cesse de concurrencer ses homologues thermiques, sans pour autant remporter de franc succès. Pourtant, en 1897, un premier projet à grande échelle voit le jour à New-York concernant la flotte de taxis. Puis, deux ans après, à la suite des premiers records de « La Jamais contente » atteignant 100 km/h, de l'ingénieur belge Camille Jenatzy, les premières motorisations grand public auraient pu être électriques. Bien que, en 1900, sur 4200 véhicules fabriqués aux Etats-Unis, 22 % étaient à essence, 38 % électrique et 40 % à vapeur, les faibles performances d'autonomie face aux thermiques eurent tôt fait de mettre fin à ce développement [5] [7].

Une situation conjoncturelle de restriction économique et énergétique pendant la Seconde Guerre mondiale a fait renaître l'intérêt pour les alimentations ou motorisations alternatives telles que les gazogènes ou les moteurs électriques [8]. Ainsi, au cours de cette période, un constructeur automobile français (Peugeot) a fabriqué 20 000 exemplaires du « Véhicule Léger de Ville » et développé la 202 électrique. La fin du conflit mondial et le réapprovisionnement de l'Europe en

combustible fossile ont mis un terme aux projets électriques. Il a fallu attendre le grand choc pétrolier de 1973 pour que le véhicule électrique réapparaisse de façon temporaire comme alternative, freiné par le peu de progrès technologiques sur les batteries et par des prix beaucoup trop élevés [5].



**Figure I-1** : Exemple de réalisation « La Jamais contente » en 1899 [6]

## **1.2.2 Véhicule d'aujourd'hui**

### **1.2.2.(a) Problématiques actuelles**

La troisième vague de véhicules électriques, moins éphémère que les deux premières, fut provoquée par une situation politique structurelle agrémentée d'une prise de conscience écologique et géologique. L'effet de serre, processus naturel d'absorption de la chaleur émise par le soleil, permet le maintien d'une température moyenne de 15 °C à la surface de la Terre. Les activités humaines (agriculture, industrie, transport...) entraînent le rejet de gaz à effet de serre (GES). La concentration de ces gaz dans l'atmosphère s'accroît et provoque un réchauffement climatique comme illustré sur la **Figure I-2**. Les travaux du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ont montré que les impacts de l'augmentation des températures en termes environnemental, social, économique, sanitaire seraient majeurs. Afin de préserver l'environnement et éviter un réchauffement climatique rapide de la planète, les pays signataires du protocole de Kyoto se sont engagés à réduire leurs émissions de principaux gaz à effet de serre de 5 % à l'horizon 2012 par rapport au niveau de 1990. Sachant que 90 % du dioxyde de carbone émis provient de la combustion des énergies fossiles (produits pétroliers, charbon, gaz naturel) et est donc directement lié aux consommations d'énergie. Le gouvernement français quant à lui, s'est fixé un objectif de division par quatre des émissions de GES par habitant pour 2050 [5].

Un autre facteur favorise l'étude d'énergies alternatives, la raréfaction des combustibles fossiles. Or, la grande majorité des combustibles utilisés dans le transport sont des combustibles liquides provenant du pétrole. Le pétrole résulte de la décomposition de matière organique emprisonnée dans des formations géologiques particulières, ce processus est très long, puisqu'il est issu du passé géologique d'une région. De part leur nature, les ressources pétrolières sont donc limitées, augmentant considérablement le coût du baril de pétrole. Une étude a montré que si le taux de découverte de ressources fossiles devait continuer à son niveau actuel et que la consommation devait augmenter, alors les ressources de pétrole seraient épuisées d'ici 2038 [9].

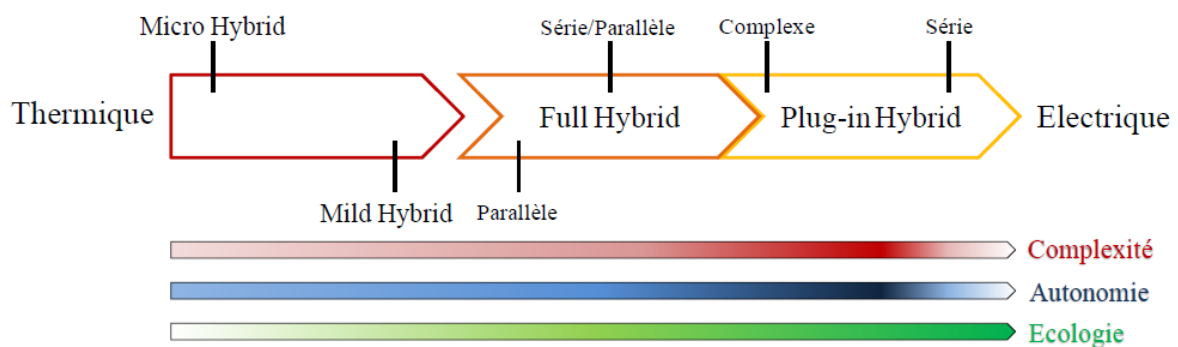
### **1.2.2.(b) L'hybride**

Un véhicule est qualifié d'hybride, si celui-ci possède deux sources de natures différentes. Cette définition n'est pas tout à fait exacte, car un véhicule traditionnel peut être assimilé à un

véhicule électrique hybride (VEH) (batterie et réservoir de carburant) [10]. Une autre définition exposée par l'International Energy Agency (IEA) dans un rapport technique [11] précise que : « un véhicule hybride a un groupe motopropulseur dans lequel l'énergie peut être transmise par au moins deux dispositifs de conversion d'énergie différents (moteur à combustion interne, turbine à gaz, machine électrique, moteur hydraulique, pile à combustible...) tirant l'énergie d'au moins deux dispositifs de stockage d'énergie différents (réservoir à carburant, batterie, volant d'inertie, supercondensateur...). L'énergie qui circule d'un dispositif de stockage aux roues, doit contenir au moins un flux réversible ou irréversible. Dans un véhicule électrique hybride le dispositif de stockage d'énergie réversible fournit l'énergie électrique ». Le concept du VEH a été développé avec les objectifs suivants [5] , [12] :

- ✓ Améliorer les conditions de fonctionnement du moteur thermique permettant une diminution de la consommation et de la pollution,
- ✓ Préparer la transition vers un réseau électrique de bord de plus haute tension et plus puissant,
- ✓ Permettre au véhicule d'être utilisé en mode tout électrique de façon à éliminer les émissions locales,
- ✓ Permettre la transition vers la consommation d'autres ressources énergétiques que le pétrole en utilisant le vecteur électrique

Les véhicules hybrides sont souvent classifiés en quatre catégories, Micro hybrid, Mild hybrid, Full hybrid et Plug-in hybrid. La chaîne de traction peut être réalisée par deux configurations principales, série ou parallèle. Afin de positionner chacune de ces catégories par rapport au VTh et au VE, sans forcément rentrer dans les détails, la figure ci-dessous donne une image d'ensemble en fonction de la complexité technologique, l'autonomie et le facteur écologique.



**Figure I-2** : Classification des différentes chaînes de traction hybride.

Les catégories Full Hybrid et Plug-in Hybrid se juxtaposent sur la **Figure I-2** afin de souligner qu'ils peuvent avoir la même architecture, le Plug-in Hybrid étant rechargeable par rapport au Full Hybrid. Les véhicules Plug-in Hybrid rassemblent à la fois les avantages de la thermique et de l'électrique, c'est-à-dire une grande autonomie et ils sont plus écologiques qu'un VTh, au détriment de la complexité. Voici quelques exemples de réalisation illustrant chacune des catégories :

- Micro Hybrid : une hybridation simple telle que la fonction « stop-start » [13], dont l'objectif est de réduire la consommation en carburant du véhicule, assuré par l'arrêt automatique du moteur thermique à chaque arrêt du véhicule (à un feu de circulation, dans un embouteillage, etc.). Le redémarrage automatique étant le plus rapide et le plus silencieux possible pour apparaître transparent pour le conducteur. Cette fonction est réalisée par un alterno-démarrreur
- Mild Hybrid : l'alterno-démarrreur est remplacé par un moteur électrique plus puissant capable d'assister le moteur thermique lors de la traction ou encore de récupérer l'énergie cinétique lors du freinage [6]. Le constructeur BMW a introduit en 2009 un modèle Mild Hybrid de la Concept Série 7 ActiveHybrid assurant les fonctions précédentes.
- Full Hybrid : il est équipé de moteurs thermique et électrique de puissance équivalente, ainsi que d'une batterie de plus grande autonomie, entraînant le véhicule en fonctionnement tout électrique. Les courtes distances à faible vitesse sont parcourues avec le moteur électrique laissant la priorité à l'essence pour les longues distances (Toyota Prius, Nissan Tino Hybrid, gamme FullHybrid Lexus) [14].
- Plug-in Hybrid : il possède les mêmes caractéristiques qu'un Full Hybrid, à l'exception d'une batterie de plus grande capacité rechargeable à partir d'une prise électrique et permettant de gagner en autonomie lors des phases de fonctionnement tout électrique [15]. Toyota a commencé la commercialisation grand-public de la Prius Hybride Rechargeable [5], [16].

### ***1.2.2.(c) Le tout électrique***

Un véhicule électrique est défini comme étant une automobile entraînée par un ou des moteurs électriques alimentés par des batteries ou des piles à combustible. L'autonomie est donc directement liée à la source d'alimentation de ces moteurs. Voici quelques exemples d'autonomies affichées par les constructeurs automobiles [5]:

- BMW MiniE : batterie lithium-ion de 32 kWh, autonomie de 200 km,
- Leaf de Nissan : batterie lithium-ion de 24 kWh, autonomie de 160 km,
- Renault Fluence : batterie lithium-ion de 22 kWh, autonomie de 160 km,
- Citroën C-Zero : batterie lithium-ion de 16 kWh, autonomie de 130 km.

### **1.2.3 Les points faibles du VE**

Le développement du VE est ralenti par de nombreux obstacles. Les principales faiblesses sont le prix et les performances techniques. En effet, aujourd'hui, les modèles tout électriques sont plus coûteux que leurs équivalents thermiques, du fait du prix élevé des batteries qui sont le plus souvent louées par les constructeurs automobiles. En ce qui concerne les performances et les capacités, voici quelques points problématiques qui nécessitent une amélioration [5]:

- La vitesse de pointe : bien qu'étant largement suffisante pour rouler en ville et sur route, elle demeure inférieure à celle des VTh comparables,
- Le volume des batteries : essentiellement positionné à l'arrière du véhicule, sous le plancher, il réduit considérablement l'espace du coffre,
- Le vieillissement et la durée de vie des batteries : encore peu maîtrisées aujourd'hui et tributaire des modes de rechargement. Le vieillissement est donc aléatoire selon les utilisateurs,

- La durée de recharge standard : entre 5 et 8 heures sur une alimentation monophasée à 220 V et le double pour du 110 V. Cela impose donc deux nouvelles contraintes, d'une part la gestion du temps d'usage et d'autre part le lieu de l'approvisionnement électrique. Les infrastructures permettant la recharge des VE sont insuffisantes à l'heure actuelle, de plus, aucune normalisation n'a été définie,
- L'autonomie : le critère le plus critique. En effet il est compliqué d'estimer la consommation car elle dépend du mode de conduite, de la vitesse, de l'inclinaison de la route, de la vitesse du vent, de la température extérieure et de l'utilisation des accessoires (éclairage, essuie-glaces, radio, etc.).

La majorité des points cités ci-dessus sont liés à la batterie. Afin d'obtenir des batteries qui soient à la fois peu onéreuses, fiables techniquement et pour qu'elles disposent d'une grande autonomie et d'une longue durée de vie, les laboratoires travaillent activement sur un certain nombre de pistes qui paraissent prometteuses à terme.

## I.3 La traction électrique

### I.3.1 Représentation de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la **Figure I-3**. Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique, source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique, moteur électrique et contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur [4] , [17]. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique [3] , [18].

Nous ne nous intéresserons ici qu'à la chaîne de traction proprement dite, mais il va de soi que la totalité des équipements électriques doit être optimisée pour maximiser l'autonomie du véhicule.

Son fonctionnement est assez simple. Lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélérateur, la batterie libère du courant. Le convertisseur transforme alors le courant continu (DC) en courant alternatif (si le moteur est de type alternatif) ou en courant continu (si le moteur est de type continu). Le moteur développe sur son arbre un couple moteur, de-ci passe sur les roues.

Un point important pour les VE, est qu'une certaine quantité d'énergie est récupérée au freinage ou en décélération. Dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui vient alors une génératrice et recharge les batteries.

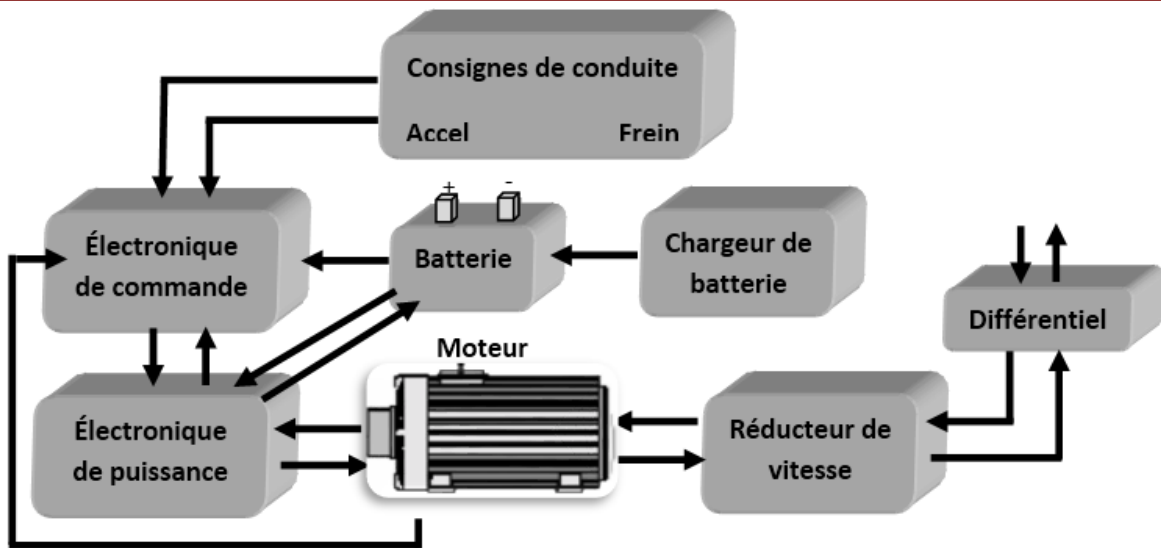


Figure I-3 : Schéma synoptique d'une chaîne de traction.

Le graphique **Figure I-4**, que nous reproduisons établit la comparaison entre le couple fourni par un moteur à essence de 1400 cm<sup>3</sup> avec boîte à quatre rapports, et le couple fourni par un moteur électrique à courant continu [19]. Si la vitesse reste limitée à 90 km/h, on constate que la troisième et quatrième vitesse perdent tout leur intérêt

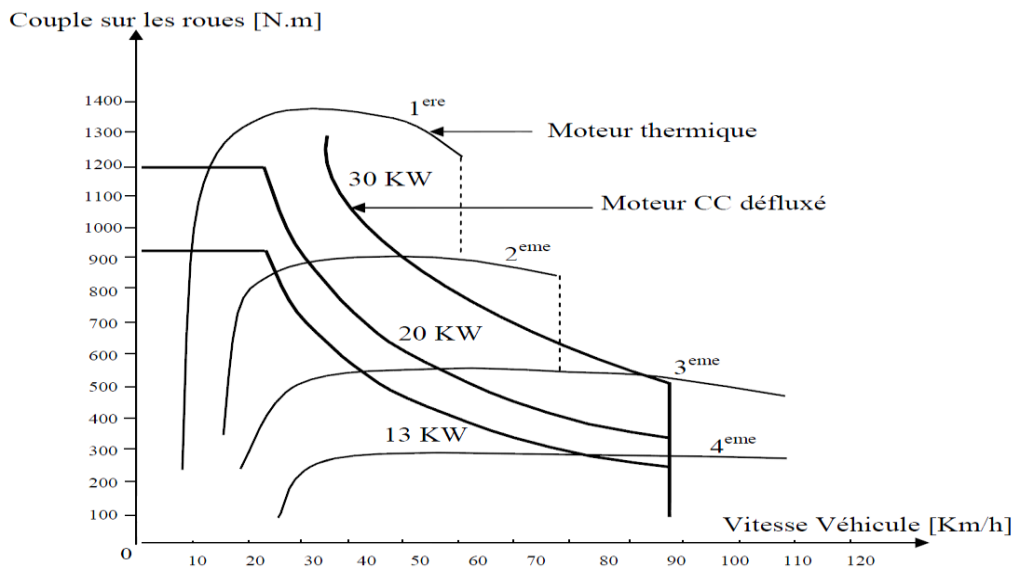


Figure I-4 : Caractéristiques couple/vitesse du moteur électrique et du moteur thermique.

Les courbes couple et vitesse du moteur électrique montrent également l'exigence du cahier des charges et la difficulté de conception de cette motorisation qui doit tenir compte de nombreuses contraintes techniques, économiques et opérationnelles du marché de l'automobile telles que [3], [4], [18] et [20]:

- Un excellent rendement à tout régime.
- Couple élevé à basse vitesse, afin de pouvoir s'insérer correctement dans la circulation.
- Un couple relativement faible à vitesse élevée.

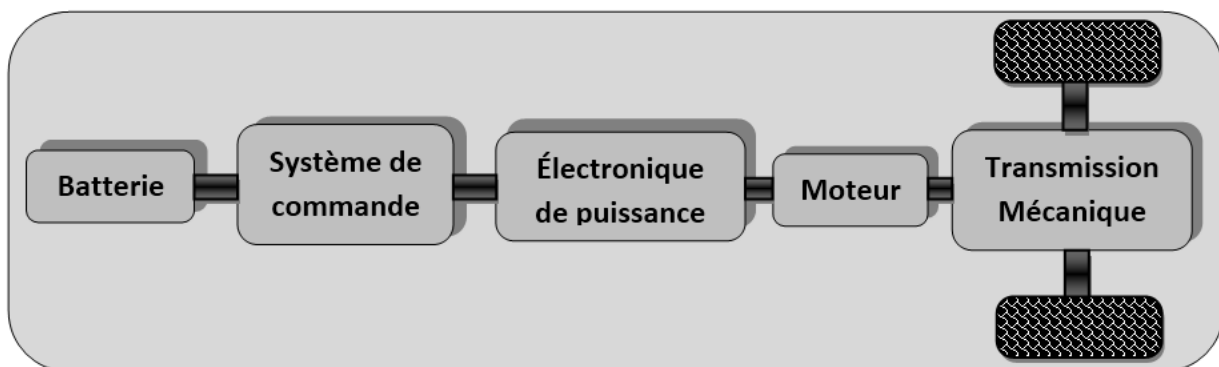
- Assurer un contrôle rapide du couple de propulsion et de freinage sur toute la gamme de vitesse.
- Large plage de vitesse et à couple variable.
- Minimiser les ondulations de couple (pour diminuer les vibrations).
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie.
- Puissance massique et volumique les plus élevées possible.
- Robustesse, faible niveau de bruit, ne pollue pas et s'adapte à toutes les situations...etc.
- Il doit pouvoir tourner et freiner dans les deux sens de rotation.
- Une construction à masse volumique la plus faible possible.
- Possibilité de récupération de l'énergie au freinage ou en décélération.

### I.3.2 Architecture de motorisation

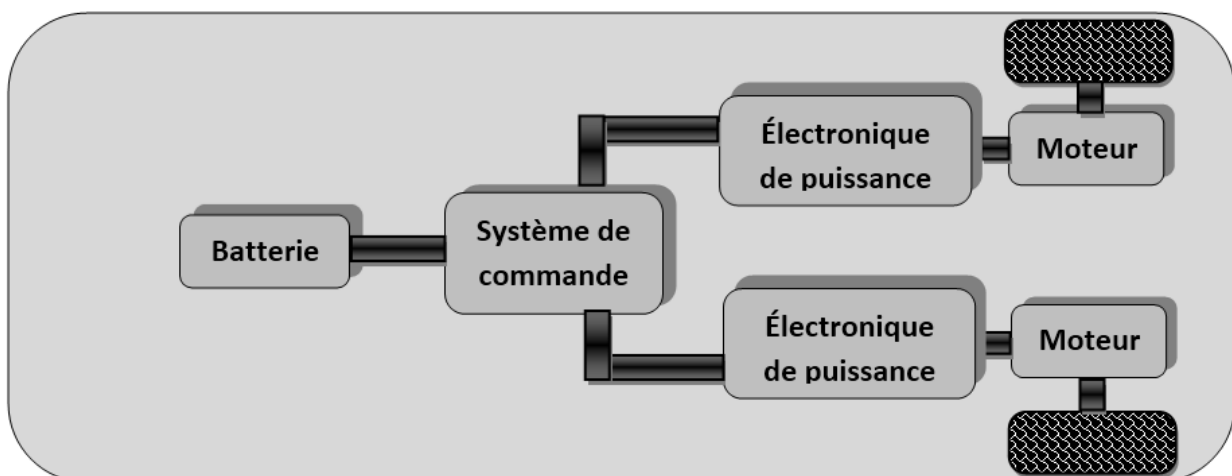
On envisage actuellement deux types d'architecture des véhicules électriques :

- Monomoteur.
- Multi-moteur.

Alors que la première présente une seule chaîne de traction **Figure I-5** , le multi moteur en comporte plusieurs **Figure I-6**.



**Figure I-5** : Architecture de motorisation (Monomoteur).



**Figure I-6** : Architecture de motorisation (Multi-moteur).



Dans la version multi moteur, la machine électrique est parfois intégrée dans la roue **Figure I-7**  
**Figure I-7** : Moteur roue. ce qui permet souvent de simplifier la transmission mécanique.

La configuration qui a été choisie est celle multi moteur. Nous pouvons justifier le choix effectué en mentionnant les principales qualités de cette configuration, et Voici les principaux avantages :

- Élimination de tous les dispositifs mécaniques de transmission.
- Introduction à la réalisation d'un différentiel électronique.
- La structure globale d'un véhicule électrique devient simple et légère.



**Figure I-7** : Moteur roue.

### **I.3.3 Motorisation pour la chaîne de traction**

Les performances globales d'un VE dépendent amplement du type de moteur d'entraînement employé. Un moteur électrique convient beaucoup mieux à la propulsion d'un véhicule qu'un moteur thermique. Les voitures électriques pourraient donc avoir une meilleure efficacité au cours de la conversion d'énergie en plus de ne pas produire les émissions associées au processus de combustion avec un bruit inférieur. De plus, un moteur électrique offre un couple élevé et s'adapte à toutes les situations. Il peut récupérer sa propre énergie, celle de la décélération. Si pour un véhicule thermique les freins transforment l'énergie cinétique en chaleur qu'il n'est guère possible de réutiliser. Le VE en revanche, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoie progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [2] , [21] et [22] :

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

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le moteur à courant continu (MCC), à induction (MI), synchrone à aimant permanent (MSAP), reluctance variable (MRV) etc.



### ***1.3.3.(a) Moteurs à Courant Continu***

La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, le choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu [23] ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en général, les 0,3 à 0,5 kW/kg alors que celle des moteurs à essence est de l'ordre de 0,75 à 1,1 kW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application. Ces raisons donc, ont conduit les différents industriels à s'orienter vers l'utilisation des machines alternatives triphasées [2].

### ***1.3.3.(b) Moteurs à Courant Alternatif***

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

**a. Moteurs à Induction** : de construction simple, robuste, ces moteurs sont peu coûteux (bon marché) et ne demandent pas d'entretien. De plus, ils supportent des surcharges pouvant aller jusqu'à 5 ou 7 fois le couple nominal [24] , [25]. De bonnes performances dynamiques du contrôle de couple peuvent être réalisées par le contrôle vectoriel ou bien par la commande directe du couple. En revanche, ces commandes assez complexes peuvent augmenter notablement le coût de revient de l'ensemble du système.

**b. Moteurs Synchrones** : Le moteur à aimants permanents admet une puissance massique plus importante mais le coût des aimants est encore élevé (champ magnétique procuré au moyen des aimants permanents de haute énergie). Ceci mène à la réduction du poids et du volume global. En outre, pas de pertes de cuivre au niveau du rotor, donc ils ont un rendement beaucoup plus élevé par rapport aux moteurs à induction. Le moteur à inducteur bobiné quant à lui, semble le mieux placé pour ce type d'application, du moment qu'il dispose d'un degré de liberté supplémentaire grâce à un circuit inducteur permettant d'ajuster le flux d'excitation [26].

**c. Machines Linéaires** : Principalement utilisée en traction électrique pour les trains à grande vitesse supérieure à 500 km/h (ce sont des systèmes de sustentation magnétique développés au Japon et qui relèvent de la très haute technologie) [2].

**d. Moteurs à Réluctance** : Construits comme un moteur asynchrone, mais avec un rapport puissance/poids très important, ils en demeurent néanmoins bruyants (ondulations du couple) [27] , [28].

Donc, à chaque application de propulsion électrique s'applique à un type de moteur différent. Il n'y a pas de moteur universel, tout comme pour les batteries et les contrôleurs. Le spécifique donnant toujours un meilleur résultat que le standard [2]. Chacun des moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté de la commande qui

s'affrontent. Le **Tableau I-1** ci-dessous résume bien, de manière qualitative, les avantages et les inconvénients des principaux types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques.

	Moteur à Courant Continu	Moteur à Induction	Moteur Synchrone à aimants permanent	Moteur à Reluctance
Rapport Puissance /Poids	0	+	++	+
Vitesse de rotation max	-	+	+	+
Rendement (%)	80-85	85-90	90-95	90-94
Contrôlabilité	++	+	+	+
Maintenance	-	+	0	+
Coût du moteur	-	++	-	+

+ : avantage 0 : neutre - : désavantage

**Tableau I-1** : Comparaison des différents Moteurs [29].

### I.3.4 Choix du moteur de traction

Le choix de moteur électrique d'un véhicule est généralement une tâche fastidieuse. Il faut dans un premier temps déterminer avec suffisamment de précision le travail qui sera accompli par chacun des moteurs. Évidemment, pour pouvoir valider un moteur, il faut connaître les spécifications et les performances que nous voulons atteindre. Le problème est toutefois beaucoup plus simple lorsque nous connaissons les caractéristiques du moteur ainsi que le travail qu'il doit accomplir et que nous désirons le valider. Le moteur en question est un moteur triphasé asynchrone à cage d'écureuil, alimenté à fréquence variable.

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil, alimenté lui aussi par onduleur triphasé, est une solution envisagée par de nombreux constructeurs, car ce moteur est bien connu et, surtout, on possède l'expérience de sa fabrication et dont le rotor peut avoir un diamètre relativement réduit, d'où une influence favorable sur le prix d'établissement, sur son volume (faible), sur son poids (modeste) et sur son entretien (quasi inexistant) [3].

Ainsi, la cage d'écureuil autorise des vitesses périphériques de 150 m/s moyennant un bon équilibrage [30]. Le "fonctionnement à puissance constante" est aussi possible mais la plage de vitesse est limitée par le rapport du couple maximal (sommet de la caractéristique de couple à flux maximal) sur le couple "nominal". Cette contrainte conduit, quelquefois, à sous utiliser le moteur en couple (nominal) pour étendre sa plage de vitesse.

### I.3.5 Convertisseur statique

Suivant l'utilisation des moteurs dans VE soit des machines à courant continu ou à courant alternatif, les convertisseurs d'énergie devront être différents. L'utilisation d'un hacheur permettra d'effectuer une conversion de type continu/continu pour alimenter une machine à courant continu ou l'inducteur d'une machine synchrone. L'onduleur permettra de faire la conversion continu / alternatif pour le stator des machines asynchrones ou synchrones.

### I.3.6 Contrôle électronique

Le contrôle électronique permet d'effectuer une optimisation au niveau de la batterie et du moteur et de faire en permanence un autodiagnostic. Il gère tous les ordres du conducteur en fonction de la capacité du véhicule électrique. C'est la raison pour laquelle, il reçoit une quantité d'informations telles que la vitesse de rotation, et les couples électromagnétiques. Cela lui permet, d'une part, d'effectuer un bilan sur l'état du véhicule, et d'autre part, d'ajuster les différentes commandes appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie.

Ainsi, l'une des priorités de la commande est d'optimiser le rendement de la chaîne de traction quels que soient les points de fonctionnement. Les paramètres d'alimentation du moteur électrique devront ainsi être constamment optimisés, non seulement en fonction du couple et de la vitesse, mais aussi en fonction de la tension batterie fortement fluctuante en fonction de l'état de charge, de l'intensité consommée et de son signe [4]. Ceci est parfaitement possible avec des processeurs numériques maintenant couramment utilisés pour le pilotage des moteurs électriques.

### I.3.7 Transmission mécanique

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

Un moteur électrique a un volume et une masse fonctions de son couple, aussi pour réduire la masse embarquée et le coût de la motorisation, on préfère généralement associer le moteur à un réducteur mécanique. Ceci permet de réduire le couple que doit fournir le moteur en augmentant sa vitesse de rotation [3]. Ainsi, a priori, on a tout intérêt à maximiser la vitesse du moteur électrique sachant qu'il existe des limites de faisabilité et que la masse du réducteur reste généralement faible devant celle du moteur. Cependant, des problèmes technologiques difficiles se posent comme la réalisation des pignons à très grande vitesse et l'obtention de bons rendements avec de grands rapports de réduction [31].

Les avantages de la transmission mécanique sont nombreux :

- Elle évite un surdimensionnement du moteur et permet donc de limiter les coûts du convertisseur statique et les batteries. En effet, le réducteur permet de réduire le couple que doit fournir le moteur et donc la masse et le coût de celui-ci.
- Elle autorise également des puissances massiques plus élevées.

## I.4 Sources d'énergie

Un des problèmes majeurs du véhicule électrique est la source d'énergie. Dans cette section, nous présentons de manière succincte deux voies technologiques possibles : les batteries et les piles à combustibles.

### I.4.1 Batteries

Pour les véhicules électriques, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries. Ces éléments permettant de stocker de l'énergie doivent remplir les conditions suivantes [3], [8] et [32]:

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids) permettant de bonnes accélérations.
- Une bonne énergie massique (Wh/Kg) étant synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles chargement/déchargement, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Disposer d'un faible entretien et constitués d'éléments facilement recyclables.

La batterie est peu onéreuse et demande peu d'entretien. Néanmoins, ses performances ne sont pas très élevées et elle possède une durée de vie trois fois moindre que celle de la pile à combustible [3], [4].

### I.4.2 Pile à combustible

La pile à combustible peut être une autre source d'énergie pour le véhicule électrique ainsi que pour d'autres applications. Cette dernière est peu polluante, possède une énergie massique plus importante et est entièrement recyclable, cela permettrait de passer à une autonomie supérieure à 400km [4]. Néanmoins, beaucoup de progrès restent à faire en matière de fiabilité, de longévité, et de sécurité [3].

## I.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les éléments de base de la chaîne de traction des véhicules électriques et de sa gestion en insistant sur les différentes technologies disponibles. Pour cela nous sommes basés sur les travaux rencontrés dans la littérature et qui peuvent être considérés comme le contexte général de notre travail. Cela nous a permis d'effectuer nos choix concernant l'architecture, le moteur, les convertisseurs et la source d'énergie.

En effet, nous étudions une structure spécifique de la chaîne de traction qui est la configuration d'entraînement direct par des moteurs roue (deux roues motrices). Nous avons choisi le moteur asynchrone. Il est alimenté par une piles à combustible à travers des convertisseurs de type onduleur.

Le contrôle indépendant des deux moteurs-roues en vitesse et en couple améliorera la motricité du véhicule et permettra des stratégies de mobilité optimisant l'architecture dans le véhicule [33].

# Chapitre II : Modélisation de la Chaîne de Traction Électrique

## **Chapitre II : Modélisation de la Chaîne de Traction Électrique**

### **II.1 Introduction**

Les entraînements régulés (associations machine électrique-convertisseur statique-commande) sont aujourd'hui utilisés dans toutes les applications requérant la variation de vitesse ou la commande de position, leur domaine d'application est donc très vaste et il comprend notamment l'industrie de la voiture électrique, de la traction électrique (métro et train) et l'aérospatial. Il existe une grande variété de moteurs électriques, pouvant être utilisés comme machine d'entraînement, et par conséquent, plusieurs types d'entraînement électronique peuvent être utilisés pour la commande de vitesse [34], [35] et [36].

La plupart des processus réels sont non-linéaires et non-stationnaires. On peut donner comme exemples le caractère non-linéaire de la saturation magnétique, l'évolution des résistances électriques avec la température, l'usure des parties mécaniques, pour se limiter au domaine des machines électriques [34].

Le choix du moteur de traction s'est porté sur un moteur asynchrone, celui-ci fait l'objet de différentes études concernant leur conception et leur commande particulièrement à vitesse variable. Le présent chapitre est consacré à la modélisation et simulation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique.

## II.2 Modélisation des éléments de la chaîne de traction

### II.2.1 La chaîne de traction asynchrone

Petit à petit, grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de l'informatique, le moteur asynchrone s'impose. S'il a de nombreux avantages comme son faible coût, son endurance et sa maintenance, sa robustesse, il nécessite en contrepartie une alimentation et une commande complexe [35], [36].

Ce dernier permet, d'obtenir une puissance massique élevée et une pollution harmonique réduite, par contre il impose l'utilisation des semi-conducteurs blocables.

La **Figure II-1** présente le schéma général d'une chaîne de traction utilisant un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension.

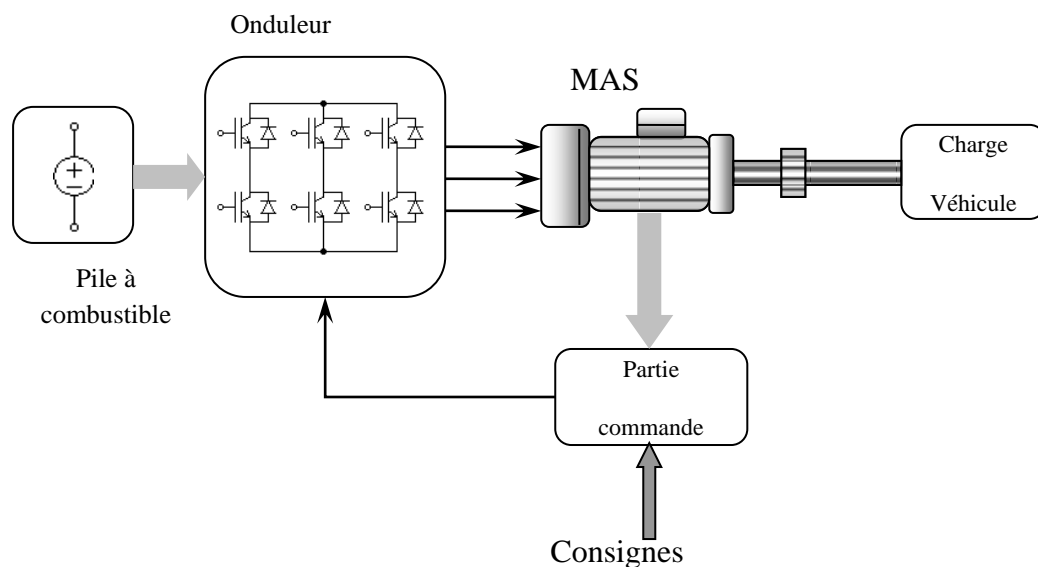


Figure II-1 : Chaîne de traction asynchrone.

### II.2.2 Constitution et principe de fonctionnement du moteur Asynchrone

#### II.2.2.(a) Définition

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif appelée aussi machine à induction, utilise le plus souvent comme moteur, et caractérisée par le fait que son rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ tournant dans l'entrefer qui est la vitesse de synchronisme, d'où le nom asynchrone [37], [38] et [39].

### II.2.2.(b) Constitution

Elle comporte un inducteur fixe nommé stator et un induit mobile nommé rotor, c'est un transformateur à champ tournant dont le primaire et le stator et dont le secondaire mis en court-circuit et libre de tourner est le rotor.

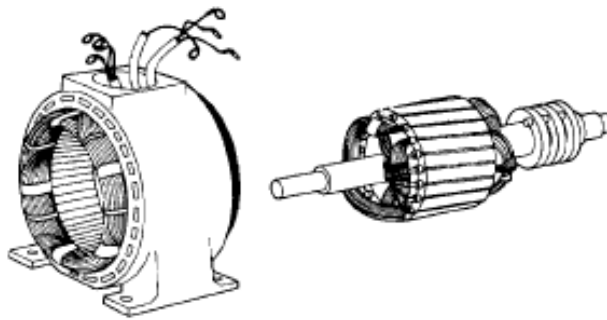
#### a) Stator

Elle est constituée par une couronne de tôles minces empilées, cette couronne est serrée dans une carcasse, et des encoches contiennent un enroulement triphasé

#### b) Rotor

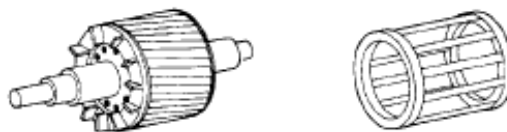
C'est un cylindre fait de tôles empilées clavetées sur l'arbre du moteur, des encoches sont percées dans les tôles de la surface extérieur du cylindre, des conducteur passent dans ces encoches, il sont réunis en court-circuit, l'ensemble forme un bobinage polyphasés ayant le même nombre de pôles que le stator [37]. Il y a deux types de structure électrique pour le rotor :

-à **bagues** : où Les trois phases sont reliées à la boîte à bornes par l'intermédiaire de bagues collectrices ( **Figure II-2**)



**Figure II-2** : Machine asynchrone à bagues.

-à **cage d'ecureil** où chaque encoche comporte une barre **Figure II-3**.



**Figure II-3** : Rotor d'une machine asynchrone à cage.



### II.2.2.(c) Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la machine asynchrone est basé sur le principe d'interaction électromagnétique ; le stator est alimenté par un courant triphasé de fréquence  $f$ , ce qui donne naissance à un champ tournant dans l'entrefer à la vitesse angulaire  $w_s$ , tel que

$$w_s = \frac{2.\pi.f}{P} \quad [rad / s] \quad (2.1)$$

Avec :

$P$  : nombre de paire de pôles.

Cette vitesse est appelée vitesse de synchronisme. Les bobines du rotor sont le siège de  $f.e.m$  induites. Comme le rotor est court-circuité ; l'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. On note que ce couple n'existe que si la  $f.e.m$  est non nulle ; le rotor ne doit pas tourner au synchronisme pour qu'il y ait couple d'où le nom de machine asynchrone [37].

Conformément à la loi de Lenz, le sens de rotation est le même que celui du champ tournant pour que la vitesse relative du champ par rapport au rotor diminue. Un couple agit sur le rotor aussi long temps que le dernier est le siège de courant induit donc aussi long temps qu'il ne tourne pas à la même vitesse de synchronisme [37] , [40] , [38] et [41].

Le glissement  $g$  est défini comme étant l'écart relatif de vitesse entre le rotor et le champ tournant

$$g = \frac{w_s - w_m}{w_s} \quad (2.2)$$

Avec :

$w_m$  : la vitesse angulaire du rotor.

La valeur de la vitesse relative du champ tournant par rapport au rotor est :

$$w = w_s - w_m = g.w_s \quad (2.3)$$

Par suite la fréquence des  $f.m.m$  est des courants induits au rotor vaut :

$$f_R = \frac{P(w_s - w_m)}{2.\pi}.g = g.f \quad (2.4)$$

Notons l'existence d'une réaction d'induit ; en effet les courants induits dans le rotor créeront aussi un champ tournant dans l'entrefer.

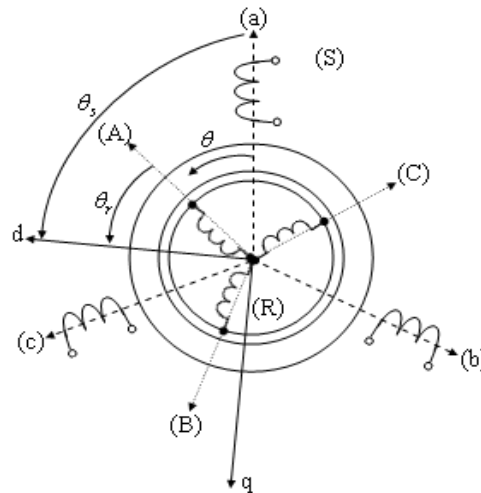
La vitesse relative de cette réaction d'induit par rapport au rotor est :

$$w_{relative} = \frac{2.\pi.f_R}{P} = \frac{2.\pi.f}{P}.g = g.w_s \quad (2.5)$$

### II.2.2.(d) Représentation schématique

Les trois enroulements statoriques (S1, S2, S3) et rotoriques (R1, R2, R3) peuvent être représentés schématiquement selon leurs axes magnétiques dans la **Figure II-4**.

On définit aussi les deux axes perpendiculaire direct d et en quadrature q.



**Figure II-4** : Représentation schématique du circuit rotoriques et statoriques d'une machine asynchrone triphasée

A partir de ce schéma, on détermine les angles de position statorique et rotoriques respectivement  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par rapport à l'axe direct d et l'angle  $\theta$  qui caractérise l'écart ou la position du rotor par rapport au stator.

### II.2.3 Modélisation de la machine asynchrone

Modéliser consiste à mettre on équations les différentiels paramètres d'un système. A l'issue de cette opération on se trouve face au problème suivant :

Plus le modèle se rapproche de la réalité qu'on ne pourra jamais atteindre, plus il deviens complexe et demande un moyen de calcul très important, par contre c'est le système est simplifie, les calcules deviennent faciles mais on s'éloigne de la réalité, un choix judicieux consiste à idéaliser la machine et par conséquent garder les phénomènes les plus important et négliger les phénomènes secondaires [37] , [38] et [39].

### II.2.3.(a) Equations électriques de la machine asynchrone

Par application de la loi de Faraday à la machine asynchrone, la loi des mailles s'exprime par les relations suivantes :

✓ Pour le stator on a :

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}] \quad (2.6)$$

✓ De même pour le rotor

$$[U_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\phi_{ABC}] \quad (2.7)$$

Les vecteurs de tension de courant et de flux sont donnés par la forme suivante :

$$[U_{abc}] = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad [i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [\phi_{abc}] = \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix}$$

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques  $[U_{ABC}]$ ,  $[\phi_{ABC}]$  et  $[i_{ABC}]$ .

### II.2.3.(b) Equation de flux

$$[\phi_{abc}] = [L_s] \cdot [i_{abc}] + [L_m] [i_{ABC}] \quad (2.8)$$

$$[\phi_{ABC}] = [L_r] \cdot [i_{ABC}] + [L_m] [i_{abc}] \quad (2.9)$$

$[L_s]$ ,  $[L_r]$ : matrices d'inductances statoriques et rotoriques

$[L_m]$  : matrices des inductances mutuelles stator-rotor

En tenant compte des hypothèses citées précédemment et à cause de la symétrie de la machine les inductances propres des phases seront constantes et égales et les inductances mutuelles seront fonction uniquement de la position angulaire  $\theta$ .

Les matrices inductances propres et la matrice mutuelle sont :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix} ; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

$$[L_m] = L_{aA} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

$L_{aa}$  : L'inductance propre d'une phase statoriques.

$L_{AA}$  : L'inductance propre d'une phase rotoriques.

$L_{ab}$  : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$L_{AB}$  : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

$L_{aA}(\theta)$  : L'inductance mutuelle entre une phase statoriques et une phase rotoriques.

En introduisant (2.8) et (2.9) dans (2.6) et (2.7), on obtient :

$$\begin{aligned} [U_{abc}] &= R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{abc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_m] \cdot [i_{ABC}] \} \\ [U_{ABC}] &= R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} \{ [L_m]_t \cdot [i_{abc}] \} \end{aligned} \quad (2.10)$$

### II.2.3.(c) Equation mécanique

Le fonctionnement d'une charge mécanique en relation est régi par l'équation fondamentale suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \cdot \Omega \quad (2.11)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie de la partie tournante.

$\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation (angulaire).

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

$C_r$  : Couple résistant.

$P$  : nombre de paires de pôle.

L'équation mécanique (2.11) peut s'écrire comme suit :

$$C_{em} - C_r = \frac{J}{P} \cdot \frac{dw_m}{dt} + \frac{f_c}{P} \cdot w_m \quad (2.12)$$

## II.2.4 Modèle de Park

### II.2.4.(a) Transformation de Park

La transformation de Park est ancienne, elle est datée de puis 1929 [37] , [38] et [42]. Elle est réapparue à cause du progrès de la technologie des composantes permettent maintenant de la réalisée en temps réel.

Elle consiste à faire un changement de variable qui permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé où les variables sont indépendantes l'une par rapport aux autres, en faisant intervenant l'angle entre les axes magnétiques des enroulements et les axes  $d$  (direct) et  $q$ (quadrature).

La matrice de transformation est donnée par

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Et la matrice de transformation inverse est :

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

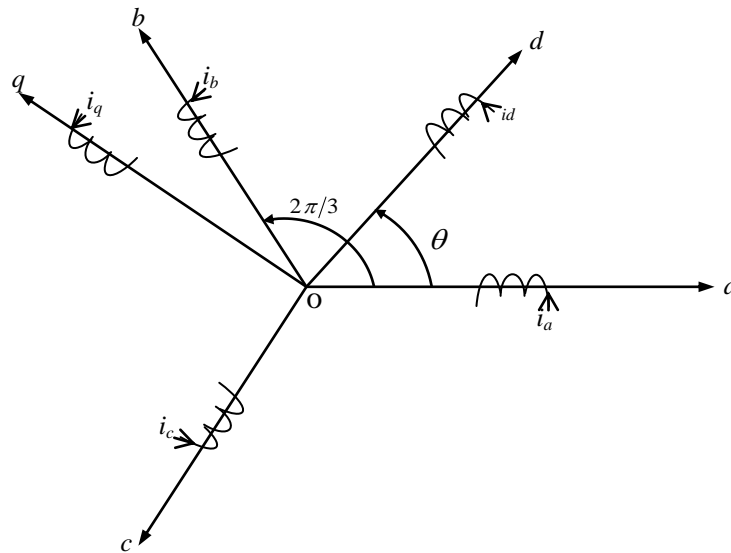


Figure II-5 : système triphasé (Oabc) et diphasé (Odq)

Posons :

$$[x_{dqo}] = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [x_{abc}] = \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Avec  $x = (i, v, \phi)$

Soit [A] la matrice de transformation directe de telle sorte que :

$$[x_{dqo}] = [A] \cdot [x_{abc}] \quad (2.16)$$

La transformation inverse est définie par :

$$[x_{abc}] = [A]^{-1} [x_{dqo}] \quad (2.17)$$

### II.2.4.(b) Application de la transformation de Park à la MAS

Dans un repère lié au champ tournant et après application de la transformation de Park aux équations de flux, de courant et de la tension précédentes on obtient après développement le système suivant [37]:

#### a- Equation de tension

Soit l'équation du stator sous forme matricielle suivante :

$$[U_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}] \quad (2.18)$$

Faisons le changement de variable, en multipliant les deux membres par [A] :

$$[A][U_{abc}] = [A][R_s][I_{abc}] + [A] \frac{d}{dt} [\phi_{abc}] \quad (2.19)$$

Dans un référentiel lié au champ tournant, on a :

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \quad (2.20)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \phi_{ds} \quad (2.21)$$

$$V_{dr} = 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_g \phi_{qr} \quad (2.22)$$

$$V_{qr} = 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_g \phi_{dr} \quad (2.23)$$

avec  $\omega_g = \omega_s - \omega_m$

#### b- Equation de flux

Soit l'équation du stator sous forme matricielle suivante :

$$[\phi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [L_m][I_{ABC}] \quad (2.24)$$

En multipliant les deux membres par [A]

$$[A][\phi_{abc}] = [A][L_s][I_{abc}] + [A][L_m][I_{ABC}] \quad (2.25)$$

L'expression des flux totalisés statoriques prend la forme :

$$\phi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (2.26)$$

$$\phi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (2.27)$$

On obtient de la même manière pour le rotor

$$\phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \quad (2.28)$$

$$\phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \quad (2.29)$$

## c- Couple électromagnétique

Dans le cas général, la puissance électrique instantanée  $P_e$  fournie aux enroulements statoriques et rotoriques s'exprime en fonction des grandeurs d'axes  $d$  et  $q$  :

$$P_e = v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs} + v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr} \quad (2.30)$$

En remplaçant les équations (2.18) (2.19) (2.20) (2.21) dans (2.30)

$$P_e = R_s \cdot i_{ds}^2 + i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} - i_{ds} \cdot w_s \cdot \phi_{qs} + R_s \cdot i_{qs}^2 + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt} - i_{qs} \cdot w_s \cdot \phi_{ds} \\ + R_r \cdot i_{dr}^2 + i_{dr} \frac{d\phi_{dr}}{dt} - i_{ds} \cdot w_s \cdot \phi_{qr} + R_r \cdot i_{qr}^2 + i_{qr} \frac{d\phi_{qr}}{dt} - i_{qs} \cdot w_s \cdot \phi_{dr} \quad (2.31)$$

Elle se décompose en trois séries de termes.

- **Puissance dissipée en perte joule**

$$P_j = R_s \cdot (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r \cdot (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) \quad (2.32)$$

- **Puissance représentant** les échanges d'énergie électromagnétiques avec les sources

$$P_{em} = i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt} + i_{dr} \frac{d\phi_{dr}}{dt} + i_{qr} \frac{d\phi_{qr}}{dt} \quad (2.33)$$

- **Puissance mécanique**

$$P_{mec} = w_s \cdot (i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}) + w_s \cdot g \cdot (i_{dr} \cdot \phi_{qr} - i_{qr} \cdot \phi_{dr}) \quad (2.34)$$

En tenant compte des équations des flux on peut écrire que :

$$P_m = w_s (i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}) \quad (2.35)$$

Or la puissance mécanique est aussi égale à  $C_{em} \cdot \Omega$  avec  $\Omega = w_m / P$

$$C_{em} = P (i_{ds} \cdot \phi_{qs} - i_{qs} \cdot \phi_{ds}) \quad (2.36)$$

En remplaçant les équations (1.33) et (1.34) dans (1.36), on obtient alors :

$$C_{em} = P \left[ (L_s I_{ds} + L_m I_{dr}) I_{qs} - (L_s I_{qs} + L_m I_{qr}) I_{ds} \right] \quad (2.37)$$

Donc :

$$C_{em} = P \cdot L_m (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (2.38)$$

$$\phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m \cdot I_{ds}, \text{ soit : } I_{dr} = \frac{\phi_{dr} - L_m I_{ds}}{L_r} \quad (2.39)$$

$$\phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs}, \text{ soit } I_{qr} = \frac{\phi_{qr} - L_m I_{qs}}{L_r} \quad (2.40)$$

En remplaçant les équations (2.39) et (2.40) dans (2.38), nous obtenons :

$$C_{em} = \frac{P \cdot L_m}{L_r} (\phi_{dr} \cdot I_{qs} - \phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (2.41)$$

### II.2.5 Model d'état de la machine asynchrone

Nous considérons comme variables d'état les courants statorique ( $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ), les flux ( $\phi_{dr}$ ,  $\phi_{qr}$ ) et la vitesse de rotation  $w_m$ , le model de la machine dans un repère ( $d$ - $q$ ) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme  $w_s$  et donné par [37], [40], [41] et [43] :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( - \left( R_s + \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot R_r \right) i_{ds} + \sigma \cdot L_s \cdot w_s \cdot i_{qs} + \frac{L_m \cdot R_r}{L_r^2} \phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{qr} w_m + V_{ds} \right) \\ \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left( - \sigma L_s w_s i_{ds} - \left( R_s + \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot R_r \right) i_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{dr} \cdot w_m + \frac{L_m \cdot R_r}{L_r^2} \phi_{qr} + V_{qs} \right) \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \phi_{dr} + (w_s - w_m) \phi_{qr} \\ \frac{d\phi_{qr}}{dt} = \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} i_{qs} - (w_s - w_m) \phi_{dr} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_{qr} \\ \frac{dw_m}{dt} = \frac{P^2 \cdot L_m}{L_r \cdot J} (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_c}{J} \cdot w_m - \frac{P}{J} C_r \end{cases} \quad (2.42)$$

Où  $\sigma$  est le coefficient de dispersion :  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r \cdot L_s}$

### II.2.6 Simulation numérique dans un référentiel lié au champ tournant

Pour simuler le comportement dynamique de la machine asynchrone, on peut utiliser le modèle d'état donné par l'équation (2.42) établis dans la section précédente. Dans notre cas, nous considérons les courants statoriques ( $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ), les flux rotoriques ( $\phi_{dr}$ ,  $\phi_{qr}$ ) et la vitesse de rotation ( $\omega_m$ ) comme variables d'état du modèle dans un repère lié au champ tournant .

La simulation a été réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink (8.5), sous les conditions de fonctionnement suivantes avec un temps de simulation de 5 sec :

- ✓ Démarrage à vide ;
- ✓ A l'instant  $t = 2$  sec application d'une charge de 400 N.m;
- ✓ A  $t = 4$  sec élimination de la charge.

La **Figure II-6** montre la simulation des performances dynamiques du modèle de la machine asynchrone, alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée, à vide et en charge.

On constate que les courants statoriques atteignent de fortes valeurs ( $3 \times 10^4$  A) pendant environ 0.12 seconde, puis ils décroissent pour atteindre le régime forcé permanent égal au régime statique. La vitesse est atteinte au bout de 0.20 seconde, et qu'elle se diminue avec l'augmentation de la



charge et puis elle augmente avec sa diminution. D'autre part, le couple électromagnétique  $Cem$  atteignent de forte valeur ( $3 \times 10^4$  A ) pendant environ 0.15 seconde, puis ils décroissent pour suit la valeur du couple résistant et une variation proportionnelle au changement de la charge du courant  $i_a$ .

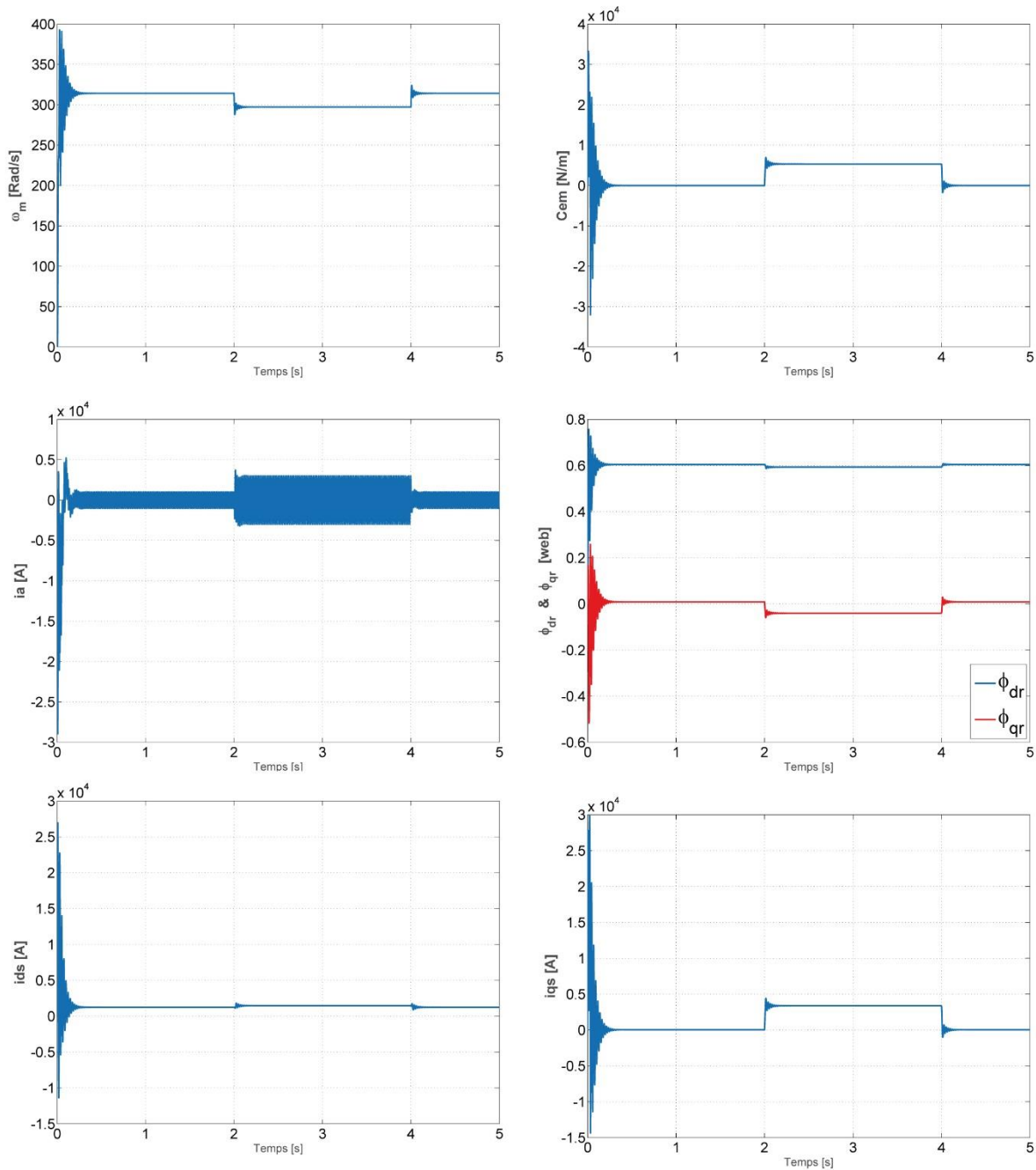


Figure II-6 : Comportement dynamique de la MAS alimenté par une alimentation parfaite.

### II.3 Modélisation du convertisseur statique

La modélisation des convertisseurs présente un souci constant des électrotechniciens. Divers travaux ont été menés dans ce domaine [44] , [45]. Nous pouvons distinguer plusieurs approches tendant à représenter soit l'évolution fine des grandeurs électriques, soit leurs valeurs moyennes.

Nous avons opté pour une méthode de modélisation à topologie variable, celle-ci consiste à considérer les semi-conducteurs comme des interrupteurs idéaux, possédant deux états possibles : fermé et ouvert [29].

Dans la première partie, nous présenterons le principe de l'onduleur de tension triphasé. Dans la seconde partie, nous présenterons la commande de l'onduleur par la modulation de largeur d'impulsions. Un modèle de l'onduleur est défini en troisième partie.

### II.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension

L'onduleur de tension permet d'appliquer de façon séquentielle la tension de la source aux bornes de la machine asynchrone suivant la commande par modulation de largeur d'impulsions.

La donne le principe de l'onduleur de tension biphasé à commande MLI [29].

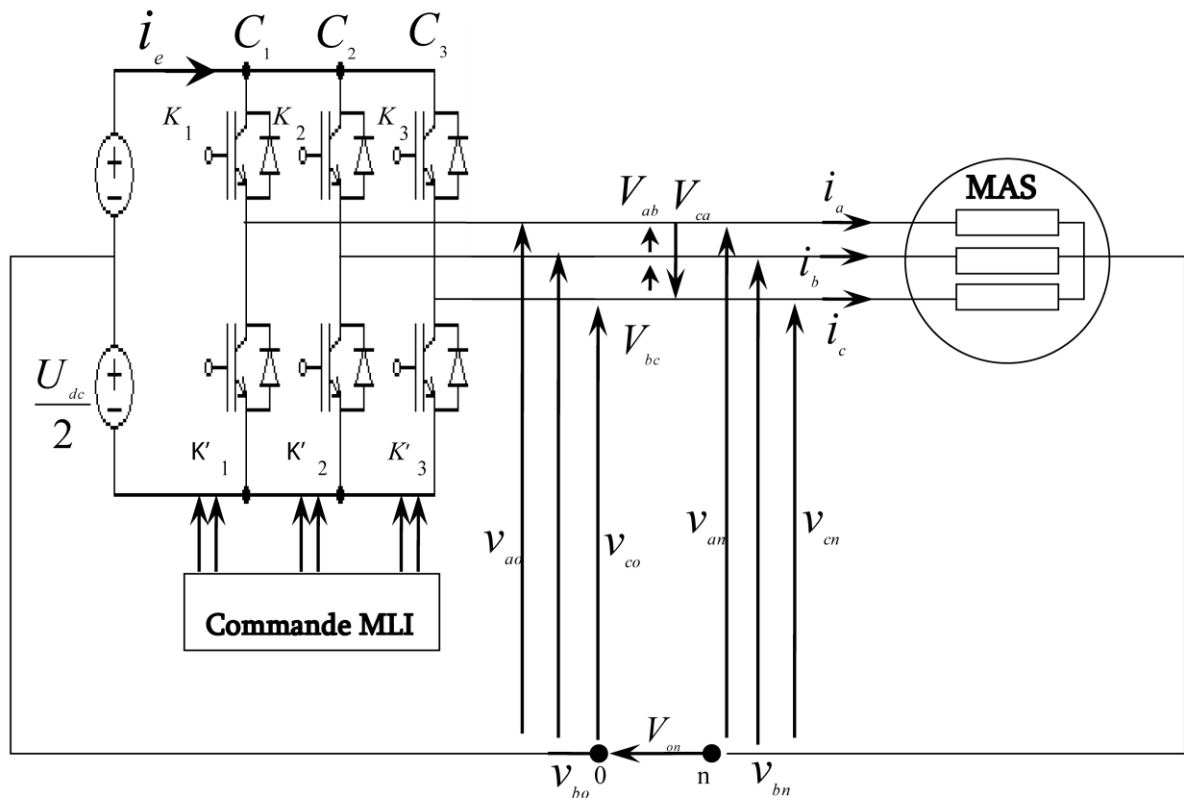


Figure II-7: Schéma de principe de l'onduleur à MLI.

Les instants de fermetures des interrupteurs, complémentaires deux à deux,  $K^1$  et  $K'^1$ ,  $K^2$  et  $K'^2$ ,  $K^3$  et  $K'^3$ , sont déterminés par les intersections des trois ondes de référence représentant les trois tensions de sortie désirées entre les trois bornes de la machine a, b, c et le point milieu (fictif) O de sa source de tension continue, avec l'onde de modulation, porteuse.

L'onduleur triphasé à six interrupteurs présenté dans la **Figure II-7** est formé par trois demi ponts monophasé à deux niveaux.

Les tensions fournies par les demi-ponts sont:

$$v_i - v_0 = \begin{cases} +\frac{U_{dc}}{2} & \text{si } K_i : \text{ fermé} \\ -\frac{U_{dc}}{2} & \text{si } K'_i : \text{ fermé} \end{cases} \quad i = a, b, c \quad (2.43)$$

On déduit ces tensions composées entre les bornes de la machine:

$$v_{ab} = (v_a - v_0) - (v_b - v_0) \quad (2.44)$$

$$v_{bc} = (v_b - v_0) - (v_c - v_0) \quad (2.45)$$

$$v_{ca} = (v_c - v_0) - (v_a - v_0) \quad (2.46)$$

Si la charge est équilibrée et couplée en étoile, les tensions  $v_a, v_b, v_c$  aux bornes des trois phases sont données par:

$$v_{an} = \frac{2}{3}(v_a - v_0) - \frac{1}{3}(v_b - v_0) - \frac{1}{3}(v_c - v_0) \quad (2.47)$$

$$v_{bn} = -\frac{1}{3}(v_a - v_0) + \frac{2}{3}(v_b - v_0) - \frac{1}{3}(v_c - v_0) \quad (2.48)$$

$$v_{cn} = -\frac{1}{3}(v_a - v_0) - \frac{1}{3}(v_b - v_0) + \frac{2}{3}(v_c - v_0) \quad (2.49)$$

Le courant fourni par la source de tension continue (batterie) est donné par:

$$i_e = i_{K_1} + i_{K_2} + i_{K_3} \quad (2.50)$$

### II.3.2 Principes des stratégies de la commande MLI

Le principe de la stratégie de commande de l'onduleur est basé sur le réglage des durées d'ouvertures et de fermetures des interrupteurs. Le critère qui est considéré dans ce chapitre est l'obtention Pour chaque tension de sortie d'une forme d'onde approximant au mieux la sinusoïde [46], [47] et [48].

Pour assurer cet objectif, la solution la plus employée consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire, d'où son appellation de « modulation sinus triangle ».

Le paragraphe suivant, on examinera la commande MLI de l'onduleur de tension triphasé.

#### II.3.2.(a) Commande par modulation de largeur d'impulsion (Modulation sinus-triangle)

La modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle est réalisée par la comparaison d'une onde sinusoïdale basse fréquence (référence) à une onde triangulaire haute fréquence (porteuse) [41], [48].

##### A. Équation de la porteuse ( $v_p$ )

La partie ascendante de  $v_p$  a pour équation:

$$v_p(t) = V_p \left(-1 + \frac{4}{T_p} t\right) \quad (2.51)$$

La partie descendante de  $v_p$  a pour équation:

$$v_p(t) = V_p \left(-\frac{4}{T_p} t + 3\right) \quad (2.52)$$

Avec:  $T_p = \frac{1}{f_p}$  (2.53)

$f_p$  : La fréquence de la porteuse.

$V_p$  : L'amplitude de la porteuse.

### B. Équations de la référence

Les signaux de la référence forment un système triphasé équilibré.

$$v_{r1} = V_r \sin w_r t \quad (2.54)$$

$$v_{r2} = V_r \sin\left(w_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.55)$$

$$v_{r3} = V_r \sin\left(w_r t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.56)$$

avec :  $w_r = 2\pi \cdot f_r$  (2.57)

$f_r$  : La fréquence du fondamentale.

$V_r$  : L'amplitude de l'onde de référence.

#### II.3.2.(b) Caractéristiques de la modulation

Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande:

- L'indice de modulation  $m$ , égale au rapport  $f_p/f_r$  des fréquences de la modulation et de la référence [29], [28], [36] et [49].
- Le coefficient de réglage en tension  $r$ , égale au rapport  $V_r/V_p$  de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation.

Dans la pratique, on s'arrange toujours pour avoir un coefficient de réglage  $r$  inférieur à l'unité de façon à éviter les ratés de commutations qui pourront entraîner des discontinuités de fonctionnement.

Dans notre étude, nous avons utilisé la modulation synchrone, c-à-d la fréquence de la porteuse  $f_p$  est un multiple entier de la fréquence de l'onde de référence  $f_r$ .

Les tensions à la sortie de l'onduleur (aux bornes de la machine) sont identiques dans l'intervalle  $\frac{T_r}{3}$  et  $\frac{2T_r}{3}$  prés.

L'indice de la modulation a pour valeur :

$$m = 3(2n - 1) \quad (2.58)$$

### II.3.2.(c) Modèle de l'onduleur

L'onduleur peut être modélisé par une matrice de connexion. A chaque interrupteur on peut associer une fonction binaire  $S_i$ , appelée fonction de connexion [29], [50], [47] et [49] :

$S_i=0$ , si l'interrupteur est ouvert

$S_i=1$ , s'il est fermé.

Les hypothèses habituelles pour l'étude des lois de commande MLI sont :

- les interrupteurs sont supposés parfaits.
- la source de chaque cellule impose un courant positif ou négatif non nul.

Dans ces conditions, on doit avoir:  $S_i + S'_i = 1$

En désignant par  $S_i$  et  $S'_i$  les fonctions de connexions des interrupteurs  $K_i$  et  $K'_i$ .

Le courant  $i_{Ki}$  qui traverse l'interrupteur  $K_i$  et la tension  $v_{Ki}$  à ses bornes ont respectivement pour expression:

$$i_{Ki} = S_i \cdot i_p \quad (2.59)$$

$$v_{Ki} = (1 - S_i) U_{dc} \quad (2.60)$$

Avec:  $i_p$  le courant commuté, correspond aux courants dans la machine  $i_a, i_b, i_c$ .

Les tensions fournies par les demi-ponts peuvent être exprimées en fonction des fonctions logiques par :

$$v_a - v_0 = \frac{U_{dc}}{2} S_a \quad (2.61)$$

$$v_b - v_0 = \frac{U_{dc}}{2} S_b \quad (2.62)$$

$$v_c - v_0 = \frac{U_{dc}}{2} S_c \quad (2.63)$$

En remplaçant les équations 2.61, 2.62 et 2.63 dans les équations, 2.47, 2.48 et 2.49 on obtient :

$$v_{an} = \frac{U_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \quad (2.64)$$

$$v_{bn} = \frac{U_{dc}}{3} (-S_a + 2S_b - S_c) \quad (2.65)$$

$$v_{cn} = \frac{U_{dc}}{3} (-S_a - S_b + 2S_c) \quad (2.66)$$

Ou sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Le courant d'entrée de l'onduleur est donné par :

$$i_e = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (2.68)$$

Les pertes dans le convertisseur ne sont pas prises en compte pour ce modèle, ce qui permet pas d'estimer le rendement du convertisseur.

II.3.2.(d) Résultats de simulation

Dans cette dernière partie, nous avons présenté les signaux de commande conducteurs de l'onduleur triphasé, générés par la commande de modulation l'impulsion, ainsi les différentes formes des tensions de l'onduleur.

Les figures **Figure II-8** et **Figure II-9** donne les formes d'ondes de référence et porteuse, et les signaux de commande  $S_a, S_b, S_c$  pour des valeurs d'impaires.

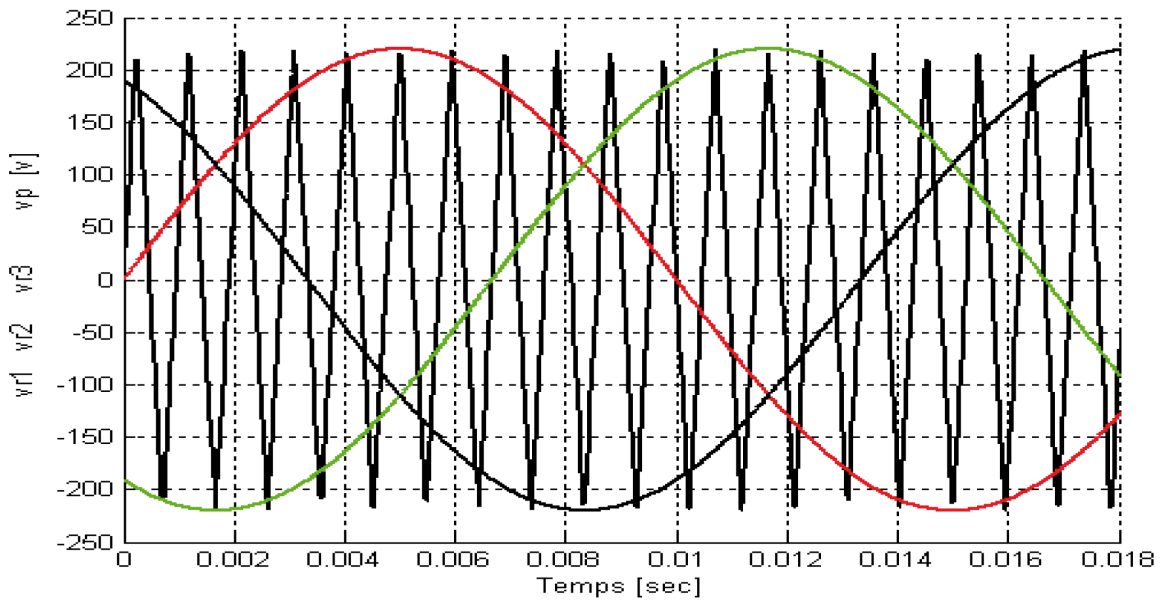


Figure II-8: Principe de la modulation 'sinus\_triangle'.

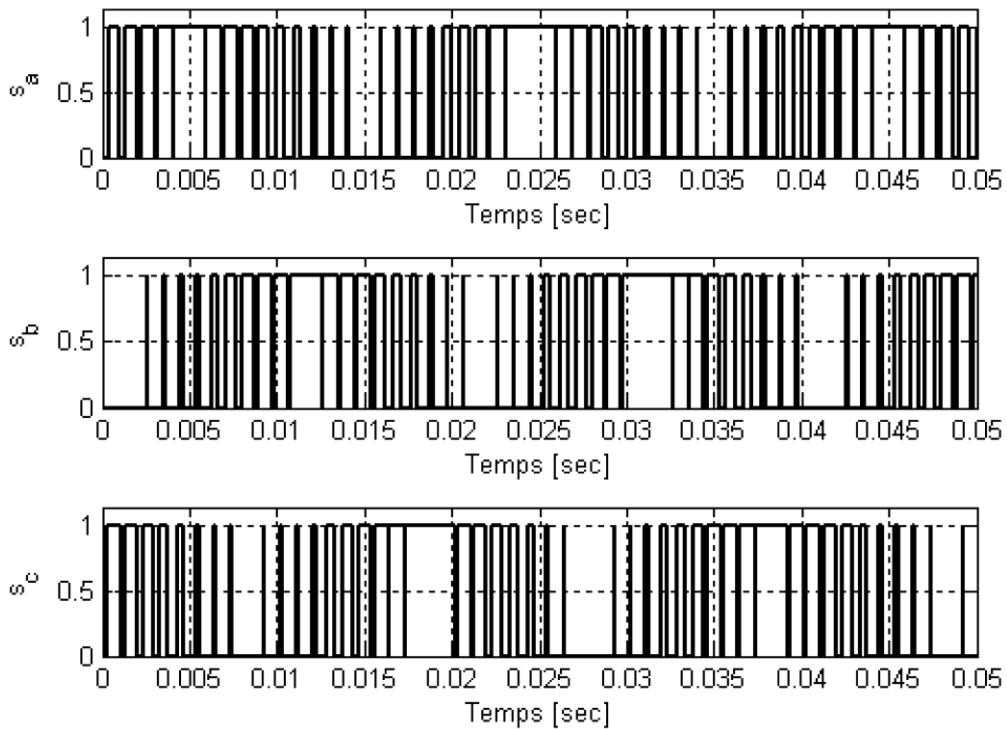


Figure II-9: Signaux de commande.

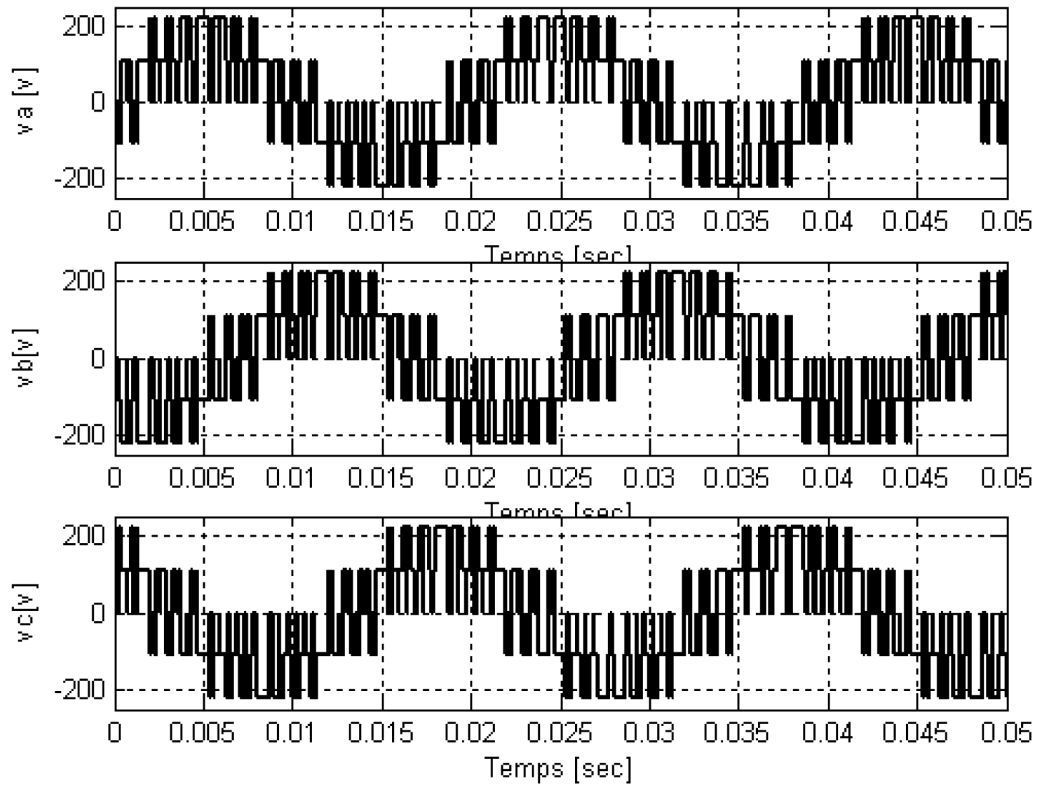


Figure II-10: Résultat de simulation de l'onduleur à commande MLI.

### II.3.3 Resultat de Simulation de MAS avec Onduleur MLI :

L'association de l'onduleur à MLI avec la MAS est schématisée par la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, les tensions de référence sont calculées par une transformation de coordonnées.

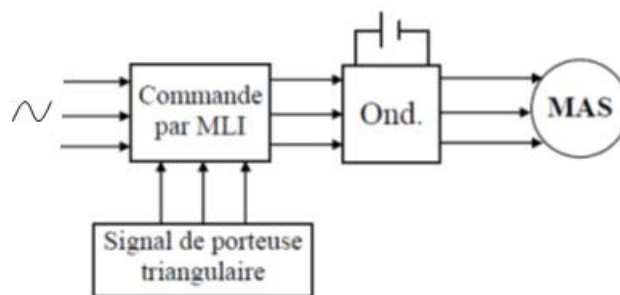


Figure II-11 : Association de l'onduleur MLI avec la MAS

La **Figure II-12** montre la simulation des performances dynamiques du modèle de la machine asynchrone, alimentée par un onduleur MLI, à vide et en charge.

La simulation de l'ensemble MAS et l'onduleur MLI a été faite sous les mêmes conditions faites avec une alimentation parfaite. On remarque que le régime transitoire dure 0,20 sec, et que la vitesse diminue avec l'augmentation de la charge puis elle augmente avec sa diminution, d'autre

part le couple électromagnétique  $Cem$  suit la valeur du couple résistant. On note aussi une forte oscillation au niveau du courant  $i_a$  qui a une variation proportionnelle au changement de la charge et une forme sinusoïdale déformée.

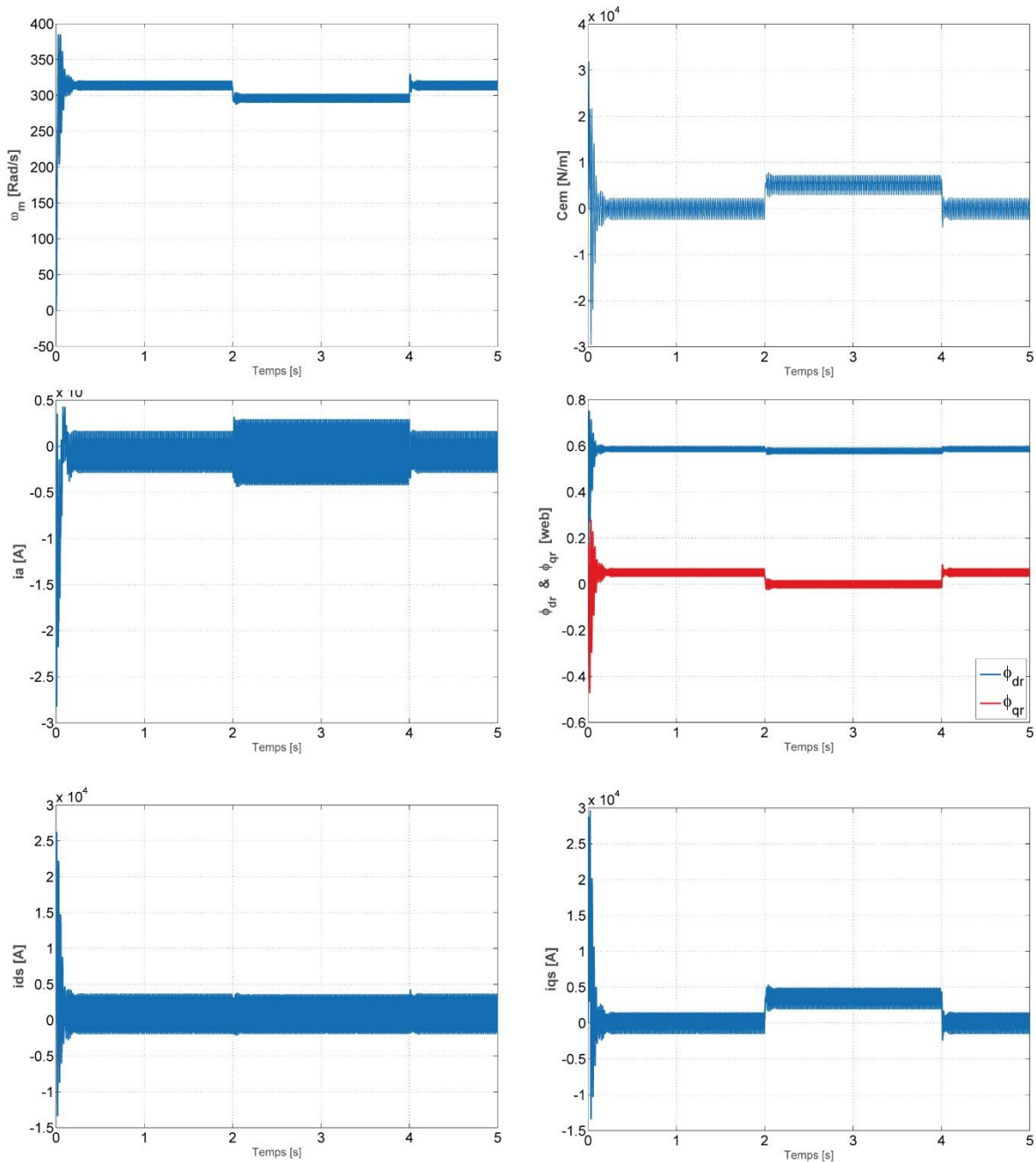


Figure II-12 : Comportement dynamique de la MAS alimenté par onduleur MLI.

## II.4 Différentiel mécanique

Le différentiel est un ensemble mécanique monté entre l'arbre de transmission et les roues motrices [34] , [44] , [51] et [52] . Le différentiel doit :



- Transmettre aux arbres transversaux qui commandent les roues motrices, le couple moteur qu'il reçoit de l'arbre de transmission, placé dans l'axe longitudinal du véhicule.
- Démultiplier la vitesse de rotation de l'arbre de transmission.
- Permettre à la roue motrice placée à l'extérieur d'un virage de tourner à plus grande vitesse que la roue placée à l'intérieur. Cette fonction particulière a donnée son nom au différentiel.

### II.4.1 Description

Le différentiel est essentiellement constitué par :

- Deux pignons planétaires A et B, sur lesquels sont invariablement fixés les deux demi-arbres moteur qui sorte en générale de part et d'autre de boîtier de différentiel.
- Un ou plusieurs pignons satellites C, qui engrènent avec les planétaires et sont fous sur leur axe ;
- Un porte-satellites F, appelé coquille du différentiel, sur lequel sont fixés les axes des satellites et qui, par l'intermédiaire de couple conique, reçoit un mouvement de rotation dont l'axe coïncide avec celui des planétaires et des demi- arbres [34] , [53].
- Tout le mécanisme de différentiel est enformé dans un carter, carter de différentiel.

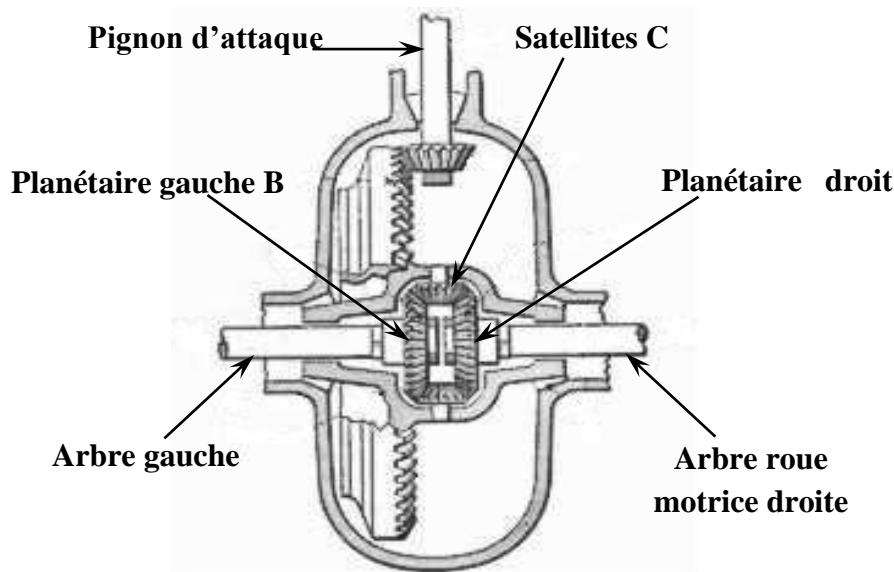


Figure II-13 : Schéma de principe d'un différentiel mécanique .

### II.4.2 Fonctionnement

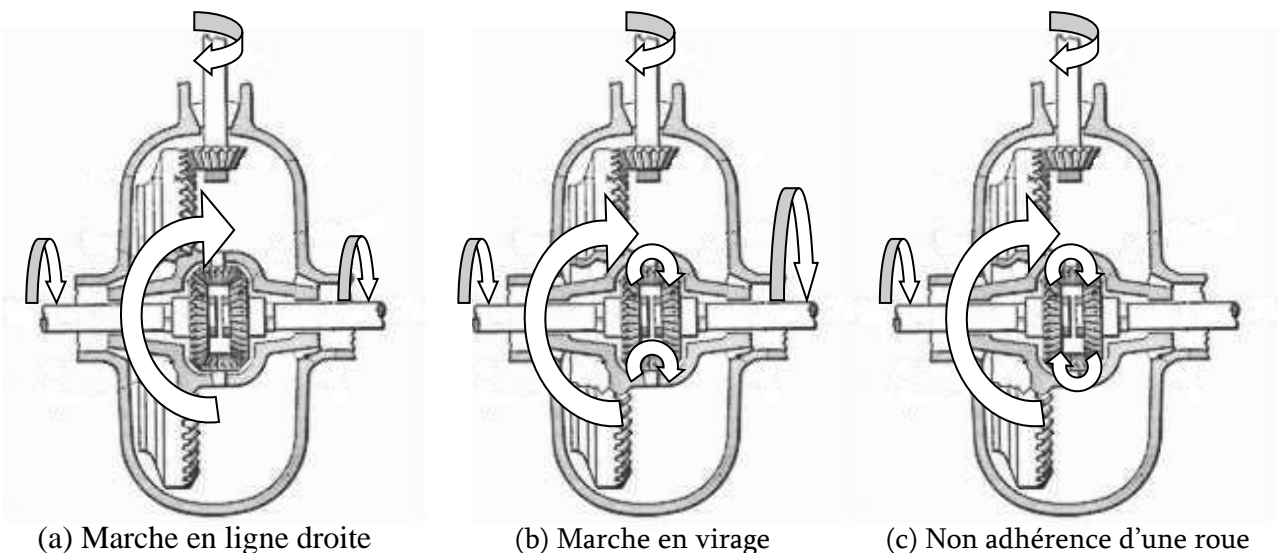
Les arbres des roues sont indépendants mais la disposition des satellites assure toujours à l'un des planétaires au moins la transmission de mouvement provenant de la couronne du différentiel [34] ,[54].

❖ **Marche en ligne droite** : Les deux roues reçoivent et transmettent le même effort, elles tournent dans le même sens et à des vitesses supposées rigoureusement identiques. Les roues motrices et les planétaires A et B tournent à la même vitesse que la coquille, et les satellites sont immobilisés par rapport à celle-ci.

❖ **Marche en virage** : Les deux roues parcourent des chemins différents, elles tournent dans le même sens, la perte de rotation de cette roue se rapporte, par l'intermédiaire des satellites que se mettent, alors à tourner plus vite et à parcourir ainsi plus de chemin. Dans ces conditions la vitesse angulaire de la roue extérieure devient supérieure à celle intérieure, les satellites ne sont pas immobilisés et les planétaires A et B ne tournent pas à la même vitesse à la coquille.

❖ **Non adhérence d'une roue** : La résistance de la roue opposée oblige les satellites, prenant appui sur le planétaire immobilisé à tourner sur eux-mêmes et à entraîner à une vitesse double de celle de la coquille, la roue qui patine sans entraîner le véhicule.

La **Figure II-14** montre le fonctionnement du différentiel.



**Figure II-14** : Fonctionnement du différentiel

## **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation individuelle de chaque bloc constituant la chaîne de traction électrique, les équations analytiques régissant le fonctionnement de l'ensemble, ainsi que leur mise sous forme d'état en vue de la simulation de tout l'ensemble. Le modèle de la machine asynchrone a été développé sur la base de Park, ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithme de commande.

Étant donné que l'onduleur peut être considéré comme un élément de connexion de la machine avec la source, et en se basant sur la méthode de modélisation à topologie variable, les semi-conducteurs ont été considérés comme des interrupteurs parfaits. En conséquence, l'onduleur a été modélisé par une matrice de connexion dont les éléments sont des variables logiques.

Chapitre III :  
Étude de la  
commande vectorielle  
d'une roue motrice

## Chapitre III : Étude de la commande vectorielle d'une roue motrice

### III.1 Introduction

Les machines à courant continu ont occupé, et pour une longue période, la majorité du marché des entraînements à vitesse variable et de la robotique. Cette machine présente l'avantage intrinsèque d'un contrôle séparé du flux et du couple. Le flux est produit uniquement par le courant d'excitation (négligeant les effets de réaction d'induit) et si le flux est fixé, le couple proportionnel au courant d'induit. La difficulté majeure rencontrée dans la commande de la vitesse d'une machine asynchrone réside dans le fait que le couple et le flux sont des variables fortement couplées et que toute action sur l'une se répercute sur l'autre [48], [38] et [55].

Au début des années 70, Blaschke et Hasse ont donné naissance à une nouvelle technique dite commande vectorielle. Cette technique, a pour objectif le découplage du flux et du couple dans les machines à courant alternatif. En fait, nous cherchons de nous rapprocher de la commande d'une machine à courant continu, sans les inconvénients liés au système balais-collecteur [48], [38], [55], [56] et [36].

Les travaux de recherche effectués sur ce sujet utilisent trois principales méthodes. La première dite « méthode directe », a été initiée par Blaschke, la deuxième dite « méthode indirecte » a été introduite par Hasse [48], [36] et la troisième dite « méthode simplifiée » est développée par Robyns sur une machine alimentée en courant dont le rôle est de linéariser le comportement de la machine [48], [36]. La nature de ces méthodes se rattache à la façon dont on génère les signaux du vecteur unitaire  $\cos(\omega t)$  et  $\sin(\omega t)$ .

Dans ce chapitre, aborderons la méthode indirecte d'orientation du flux rotorique (IFOC), et pour le réglage du courant et de la vitesse nous avons utilisé un contrôleur conventionnel Proportionnel - Intégral (PI).

### III.2 Principe de la commande vectorielle

L'algorithme de référence de commande de la machine asynchrone est la commande à flux orienté (Field Oriented Control) a été mis au point par Blaschke en 1972 [48], [56] et [36]. Cette méthode a marqué un pas décisif dans la façon de concevoir la commande des machines à courant alternatif. En effet, jusqu'aux développements théorique et pratique de Blaschke, seule la commande scalaire était utilisée. A partir du constat que la machine à courant continu était commandée via un découplage naturel, l'idée fondamentale de Blaschke fut de mettre au point une commande permettant de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui de la machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux rotorique. Par conséquent, ceci permet de commander le flux de la machine avec un courant  $i_{ds}$  qui est l'équivalent du courant inducteur de la machine à

courant continu. A condition de travailler à flux constant, un courant orthogonal  $i_{qs}$  permet de contrôler le couple électromagnétique, correspondant au courant induit de la machine à courant continu.

Trois méthodes de commandes vectorielles sont possibles :

La commande vectorielle directe ‘‘DFOC’’ : le flux est régulé par une contre-réaction. Il doit être donc mesuré ou estimé. L’angle d’orientation  $\theta_s$  est généralement calculé à partir des composantes du flux dans le repère stationnaire lié au stator et la pulsation statorique  $\omega_s$  est déterminée en dérivant par rapport au temps la position  $\theta_s$  [48] , [56] et [36].

La commande vectorielle indirecte ‘‘IFO’’ : la position du flux est estimé du modèle de la machine. On détermine, en premier lieu la pulsation du glissement à partir du modèle inverse. Puis, on additionne le glissement à la vitesse du rotor pour obtenir la pulsation du champ tournant. L’intégration de cette dernière fournit l’angle d’orientation  $\theta_s$  [48] , [56] et [36].

La commande vectorielle simplifiée : qui sert à linéariser le modèle de la machine asynchrone et le rendre similaire à celui d’une machine à courant continu à excitation séparée [48] , [36] et [57].

### III.2.1 Equations dans le repère d-q

Le principe de la commande vectorielle est de réduire l’équation de couple électromagnétique de la machine asynchrone afin d’être comparable à celle d’une machine à courant continu. Dans le deuxième chapitre, Nous avons vu que le couple en régime transitoire s'exprime dans le repère  $d$ - $q$  comme un produit croisé de courants ou de flux, soit :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \tag{3.1}$$

L’objectif est de simplifier un des deux termes contenus dans les parenthèses en rendant nulle dans un axe de Park, normalement nous choisissons l’axe  $q$  [48] et [58] . Alors le couple ressemble à celui d'une machine à courant continu. Donc, il suffit d'orienter le repère  $d$ - $q$  de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct  $d$  et donc avoir  $\phi_{qr} = 0$  et  $\phi_r = \phi_{dr}$  ( **Figure III-1** )

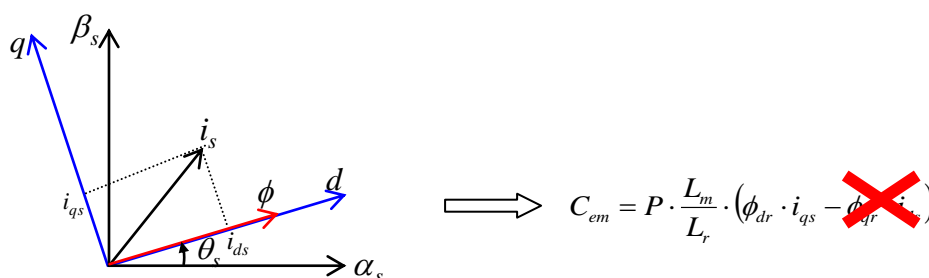


Figure III-1 : Principe d’orientation du flux rotorique

Dans ce cas, le flux dans l'axe 'q' a été éliminé, ceci veut dire que tout le flux rotorique se retrouve sur l'axe  $d$ , l'équation (3.1) peut s'écrire :

$$C_{em} = P \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{dr} \cdot i_{qs} \quad (3.2)$$

A partir de là, le modèle de la machine (2.42) s'écrit :

$$\frac{d}{dt} i_{ds} = -\gamma \cdot i_{ds} + \omega_s \cdot i_{qs} + \frac{K}{\tau_r} \cdot \phi_{dr} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot v_{ds} \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} i_{qs} = -\gamma \cdot i_{qs} - \omega_s \cdot i_{ds} - P \cdot \Omega \cdot K \cdot \phi_{dr} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot v_{qs} \quad (3.4)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_{dr} = \frac{L_m}{\tau_r} \cdot i_{ds} - \frac{1}{\tau_r} \cdot \phi_{dr} \quad (3.5)$$

$$\frac{d}{dt} \phi_{qr} = 0 = \frac{L_m}{\tau_r} \cdot i_{qs} - (\omega_s - P \cdot \Omega) \cdot \phi_{dr} \quad (3.6)$$

$$J \cdot \frac{d}{dt} \Omega = P \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{dr} \cdot i_{qs} - C_r - f \cdot \Omega \quad (3.7)$$

En utilisant l'opérateur de la transformé de Laplace  $s = \frac{d}{dt}$ , l'équation (3.5), peut être réécrite :

$$\phi_{dr} = \frac{L_m}{1 + s \cdot \tau_r} \cdot i_{ds} \quad (3.8)$$

D'autre part, à partir de l'équation (3.2), le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = P \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_{dr} \cdot i_{qs} \quad (3.9)$$

Donc à flux  $\phi_{dr}$  constant, la composante  $i_{ds}$  commande le flux rotorique et la composante  $i_{qs}$  commande le couple électromagnétique, c'est pourquoi on parle de découplage dans la commande vectorielle.

Notons que le problème essentiel de la commande est de déterminer la norme et la position du flux rotorique, qui ne sont pas mesurables directement. Il est nécessaire de connaître ces deux grandeurs pour le contrôle du régime dynamique de la machine. Dans la suite, on va présenter la méthode indirecte de la commande vectorielle.

### III.2.2 Commande vectorielle indirecte ( IFOC )

La méthode indirecte consiste à ne pas estimer l'amplitude du flux rotorique mais à utiliser directement l'amplitude de référence  $\phi_{dr}^*$  [48] , [55] , [36] , [59] et [60]. Le flux dans ce cas n'est pas régulé, les capteurs de flux, les estimateurs et les observateurs ne sont pas nécessaires. Nous n'avons donc pas de connaissance du module et de la phase du flux rotorique, ceci exige une mesure de la position rotorique. Cette commande est plus simple mais évidemment a des performances plus faibles par rapport au contrôle direct, ceci est due à la sensibilité de ce type de commande face aux variations de la constante du temps rotorique [48] , [59] et [60].

L'intérêt de cette méthode est d'utiliser uniquement des grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées. En effet, à partir d'un couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$  et du flux rotorique de référence  $\phi_{dr}^*$ , les courants de références  $i_{ds}^*$  et  $i_{qs}^*$  s'en déduisent directement grâce aux équations du modèle d'état (2.42) :

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} \cdot (\tau_r \cdot \dot{\phi}_{dr}^* + \phi_{dr}^*) \quad (3.10)$$

$$i_{qs}^* = \frac{L_r}{P \cdot L_m} \cdot \frac{C_{em}^*}{\phi_{dr}^*} \quad (3.11)$$

On peut obtenir la position du repère par intégration (après utilisation de l'opérateur de la transformé de Laplace ) de l'équation (3.6), sachant d'une part que la mesure de la position mécanique  $\theta_r$  est nécessaire et d'autre part que la composante  $\phi_{dr}$  correspond à la référence, c'est-à-dire  $\phi_{dr} = \phi_{dr}^*$ .

$$\theta_s^* = P \cdot \theta_r + \int_0^t \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{i_{qs}^*}{\phi_{dr}^*} dt \quad (3.12)$$

La méthode de commande indirecte se caractérise donc par le fait qu'aucune estimation du flux n'est nécessaire, le contrôle vectoriel est alors simplifié. La méthode repose en fait en grande partie sur la capacité de l'onduleur et de sa commande à imposer les courants désirés dans la machine. En effet, à partir de l'instant où le système n'impose pas les courants désirés, cette commande perd sa principale propriété de découplage entre flux et couple. Cette méthode consiste à générer à l'aide d'un bloc IFOC (Indirect Field Oriented Control), les tensions d'alimentation afin d'obtenir un flux et un couple désirés.

Tenant compte de l'alimentation en tension de la MAS, les grandeurs de commande sont les tension  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$ .



$$\begin{aligned}
v_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\phi_r}{dt} - \sigma \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs} \\
v_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_r + \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{ds}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Le couplage, qui existe entre les deux équations ( $v_{ds}, v_{qs}$ ), peut être évité en utilisant plusieurs méthodes de compensation possibles [48], [38], [55] et [36].

- Découplage par compensation classique.
- Découplage par la méthode feed-forward.
- Découplage par la méthode de Cross-coupling (couplage croisé).
- Méthode de compensation dynamique.

### III.2.3 Découplage par compensation classique

Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage [48], [36] et [57]. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs de courant pour obtenir les tensions de références nécessaires pour le réglage **Figure III-2**. Les termes supplémentaires sont déterminés de sorte que les tensions restantes soient en relation du premier ordre avec les courants correspondants.

Les tensions à la sortie des régulateurs sont données par :

$$\begin{aligned}
v_{ds}^r &= R_s i_{ds} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{ds}}{dt} \\
v_{qs}^r &= R_s \cdot i_{qs} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{qs}}{dt}
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Les tensions de couplage sont données par :

$$\begin{aligned}
v_{ds}^c &= \frac{L_m}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt} - \sigma \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot i_{qs} \\
v_{qs}^c &= \omega_s \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \phi_r + \sigma \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot i_{ds}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Le terme  $\frac{L_m}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt}$  est nul, en considérant le régime permanent.

D'où les tensions de référence nécessaires pour le réglage :

$$\begin{aligned}
v_{ds}^* &= v_{ds}^c + v_{ds}^r \\
v_{qs}^* &= v_{qs}^c + v_{qs}^r
\end{aligned} \tag{3.16}$$

La pulsation  $\omega_s^*$  nécessaire pour la transformation inverse de Park, afin d'avoir les tensions de référence réelles, est calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$\omega_s^* = \omega_r + \frac{L_m R_r}{L_r \phi_r} i_{qs} \tag{3.17}$$

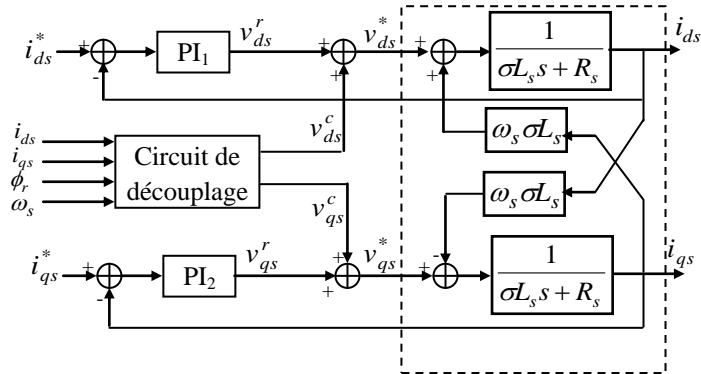


Figure III-2 : Découplage par compensation classique

Le schéma de principe de la loi de commande vectorielle indirecte est présenté dans (Figure III-3) [36] , [61].

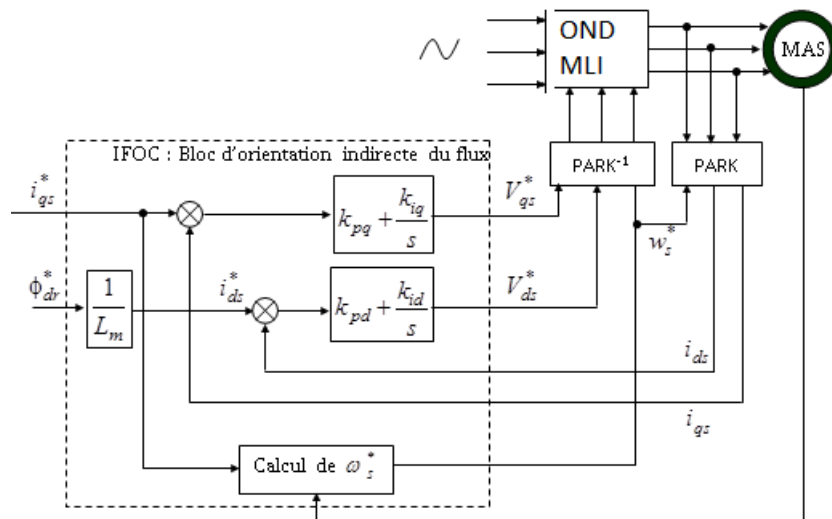


Figure III-3 : Schéma de principe de la commande vectorielle indirecte [36] , [61].

Le bloc de contrôle IFOC (génère les trois grandeurs de commande  $V_{ds}^*$ ,  $V_{qs}^*$  et  $\omega_s^*$  en fonction des deux entrées de référence  $(i_{qs}^*, \phi_{dr}^*)$  qui assurent le découplage.

Dans cette commande l'angle  $\theta_s$  utilisé dans les transformation de Park est calculé par :

$$\theta_s = \int \left( \omega + \frac{i_{qs}^*}{T_r \cdot i_{ds}^*} \right) dt \quad (3.18)$$

Avec :

$$i_{ds}^* = \frac{\phi_r^*}{L_m} \quad (3.19)$$

Ces grandeurs de commande générées par le IFOC sont utilisées pour contrôler les composants : direct  $i_{ds}$  et quadratique  $i_{qs}$  du courant statorique de façon à obtenir des courants identiques aux courants de référence, et par conséquent, le flux et le couple maintenus à leurs valeurs de référence [48], [36].

Le calcul des régulateurs pour le cas de la compensation classique est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles [48], [57].

### III.2.4 Calcul des régulateurs de courant et de vitesse

Pour nous assurer que les courants réels suivent les courants de consigne, des régulateurs de courants agissant sur les tensions de commande sont exigées. Le régulateur que nous allons utiliser est du type proportionnel intégral (PI), et son dimensionnement sera basé sur la méthode d'imposition de pôles.

#### a) Régulateur du courant $i_{qs}$

Le régulateur du courant en quadrature fournit la tension  $v_{qs}^*$  nécessaire pour maintenir le couple à sa valeur de référence. La fonction de transfert  $i_{qs} / v_{qs}^*$  est donnée par :

$$\frac{i_{qs}}{v_{qs}^r} = \frac{1/\sigma L_s}{s + \rho_s} \quad (3.20)$$

Avec :

$$\rho_s = R_s / \sigma L_s$$

La boucle de régulation du courant est représentée par la **Figure III-4**.

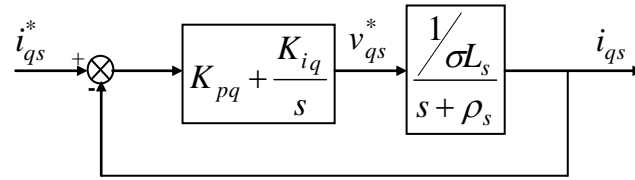


Figure III-4 : Schéma de régulation du courant

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\frac{i_{qs}}{i_{qs}^*} = \frac{(K_{pq} \cdot s + K_{iq}) \left( \frac{1}{\sigma L_s} \right)}{s^2 + \frac{R_s + K_{pq}}{\sigma L_s} \cdot s + \frac{K_{iq}}{\sigma L_s}} \quad (3.21)$$

L'équation caractéristique est du deuxième ordre, donc en imposant deux pôles complexes conjugué à partir réelle négative  $s_{1,2} = -\rho_q \cdot (1 \pm j)$  d'où :

$$\rho(s) = s^2 + 2 \cdot \rho_q \cdot s + 2 \cdot \rho_q^2 \quad (3.22)$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} K_{iq} = 2 \cdot \sigma \cdot L_s \cdot \rho_q^2 \\ K_{pq} = 2 \rho_q \cdot \sigma \cdot L_s - R_s \end{cases} \quad (3.23)$$

**AN:** 
$$\begin{cases} K_{iq} = 11.6493 \\ K_{pq} = 0.0215 \end{cases}$$

### b) Régulateur du courant $i_{ds}$

Le régulateur du courant direct fournit la tension  $v_{ds}^*$  nécessaire pour maintenir le flux à sa valeur de référence.

La fonction de transfert  $i_{ds}/V_{ds}^*$  est donnée par :

$$\frac{i_{ds}}{v_{ds}^*} = \frac{1/(\sigma \cdot L_s)}{s + R_s/\sigma L_s} \quad (3.24)$$

Les mêmes calculs effectués pour le régulateur du courant  $i_{qs}$  sont appliqués à ce régulateur. Les paramètres du régulateur sont donc les mêmes et ils sont donnés par :

$$\begin{cases} K_{id} = 2 \cdot \sigma \cdot L_s \cdot \rho_d^2 \\ K_{pd} = 2 \cdot \rho_d \cdot \sigma \cdot L_s - R_s \end{cases} \quad (3.25)$$

**AN:** 
$$\begin{cases} K_{id} = 11.6493 \\ K_{pd} = 0.0215 \end{cases}$$

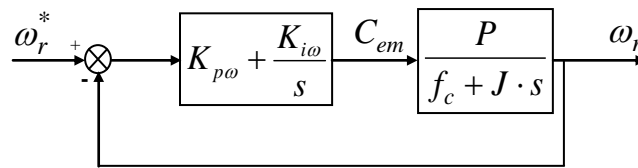
**c) Calcul du régulateur de vitesse**

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, a fin de maintenir la vitesse correspondante. Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit très rapide par rapport à celle de la vitesse.

L'équation mécanique donne :

$$\frac{\omega_r}{C_{em}} = \frac{P}{f_c + J \cdot s} \quad (3.26)$$

Le schéma bloc de régulation de la vitesse est indiqué par la **Figure III-5**.



**Figure III-5** : Schéma bloc de régulation du la vitesse.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{\omega_r}{\omega_r^*} = \frac{(K_{p\omega} \cdot s + K_{i\omega}) \frac{P}{J}}{\rho(s)} \quad (3.27)$$

L'équation caractéristique  $\rho(s)$  est :

$$\rho(s) = s^2 + \frac{f_c + K_{p\omega} \cdot P}{J} \cdot s + \frac{K_{i\omega} \cdot P}{J} = 0 \quad (3.28)$$

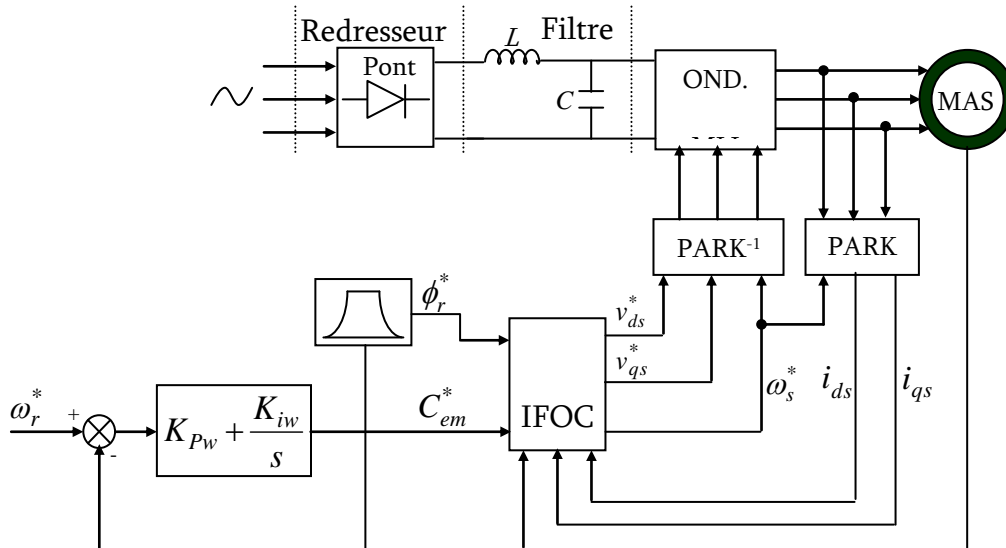
Par imposition de deux pôles complexes conjugués  $s_{1,2} = \rho_\omega \cdot (1 \mp j)$  en boucle fermée et par identification, on obtient les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{cases} K_{i\omega} = \frac{2 \cdot J \cdot \rho_\omega^2}{P} \\ K_{p\omega} = \frac{2 \cdot \rho_\omega \cdot J - f_c}{P} \end{cases} \quad (2.69)$$

**AN:** 
$$\begin{cases} K_{i\omega} = 384 \\ K_{p\omega} = 23.9994 \end{cases}$$

**III.2.5 Réglage de vitesse de la MAS par la commande vectorielle indirecte**

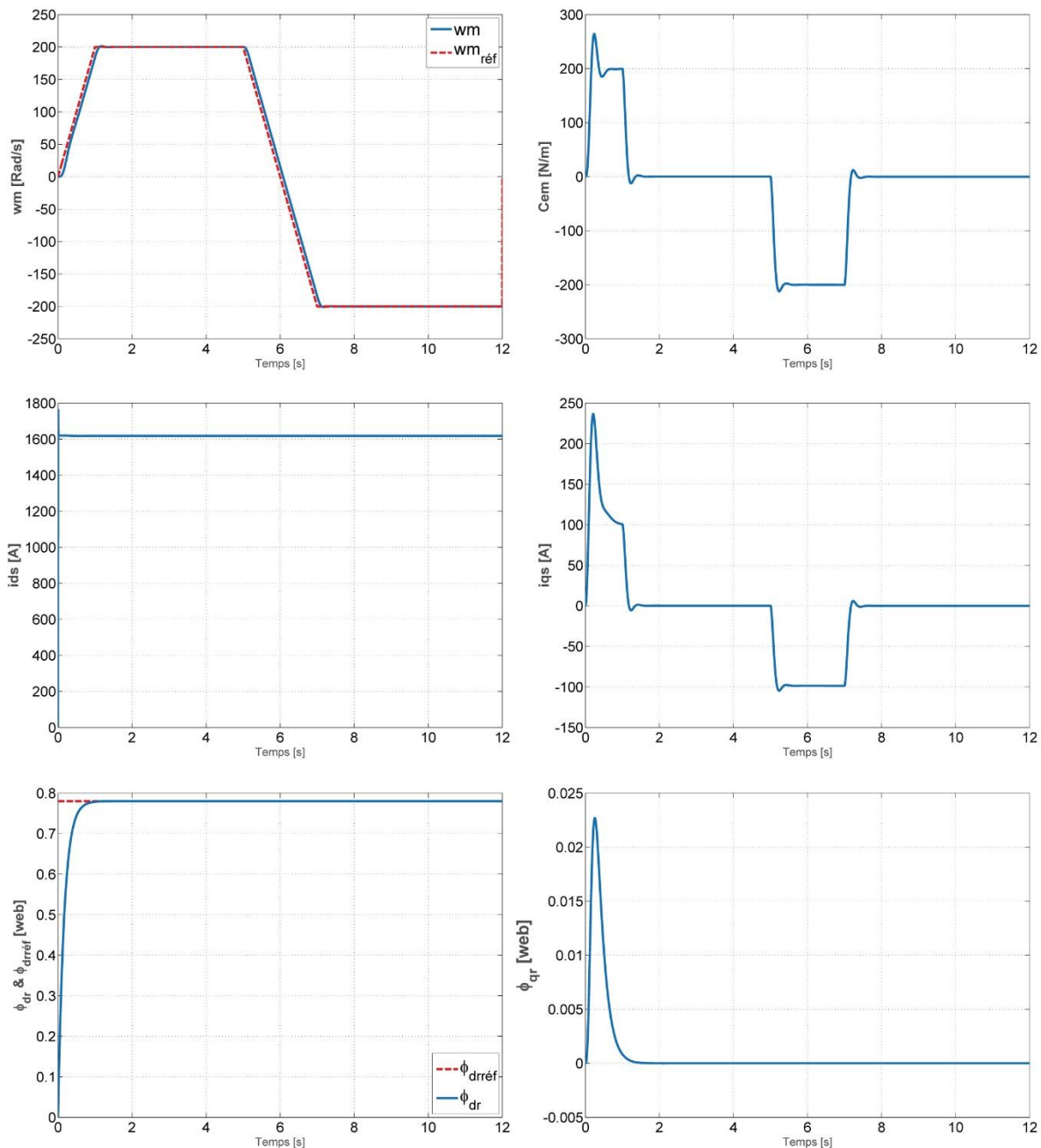
Le schéma de principe de la commande en vitesse de la machine asynchrone par la méthode indirecte est présenté par la **Figure III-6**



**Figure III-6 :** Schéma de principe de la commande vectorielle indirecte d'une MAS

**III.2.5.(a) Résultats de simulation à vide (Test de découplage)**

Pour vérifier l'efficacité du découplage entre le flux rotorique  $\phi_r^*$  et le couple électromagnétique par la méthode de compensation classique (comme exemple), nous avons simulé les réponses de flux  $\phi_{dr}$  et  $\phi_{qr}$ , le couple électromagnétique  $C_{em}$  et les courants  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  **Figure III-7**. Les résultats de simulation obtenus nous montrent que le flux rotorique suit sa valeur de référence. Par contre, il présente des fluctuations (ondulations) durant le démarrage.



**Figure III-7** : Résultats de simulation de test de découplage de l'orientation du flux rotorique par la méthode indirecte

### III.2.5.(b) Résultats de simulation en charge

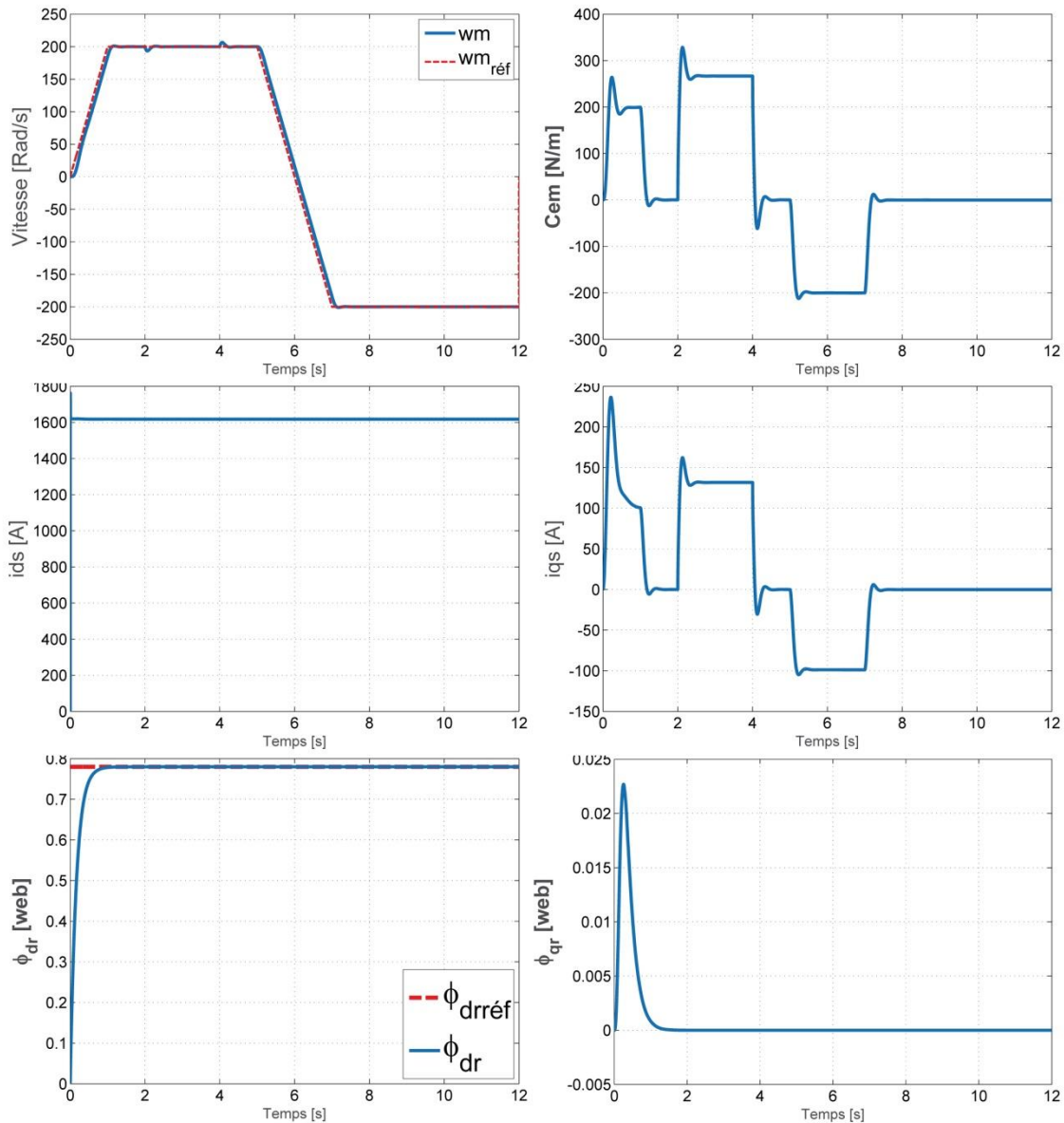
Pour évaluer les performances de la commande vectorielle indirecte en vitesse, nous avons effectués des simulations numériques sous les conditions suivantes :

Démarrage à vide avec application d'un échelon de vitesse de 200 [rad/s], application d'un couple de charge ( $C_r=200$  [N.m]) à l'instant  $t = 2$  s, et puis la charge est éliminée à l'instant  $t = 4$  s. Puis une application d'un changement de consigne à l'instant  $t = 5$  s (**Figure III-8**). Les résultats nous montrent clairement que la vitesse suit sa valeur de référence avec un dépassement et un bon rejet des perturbations. En plus, le courant est maintenu à sa valeur admissible. Le découplage entre le flux et le couple est maintenu.

On note aussi, une amélioration visible apportée sur la dynamique du couple et en conséquence sur la dynamique de la vitesse par le réglage indirect.

La **Figure III-8** présentent les résultats de simulations des réponses des courants ( $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ), le couple électromagnétique  $C_{em}$ , les flux rotorique  $\phi_{qr}$ ,  $\phi_{dr}$  et le flux de référence  $\phi_{dr}^*$ . Les résultats obtenus nous montrent l'efficacité de la méthode de découplage par compensation classique, montre que le réglage par un régulateur PI donne des résultats satisfaisants :

- La vitesse de rotation suit la vitesse de référence.
- Le courant est bien limité à sa valeur admissible.

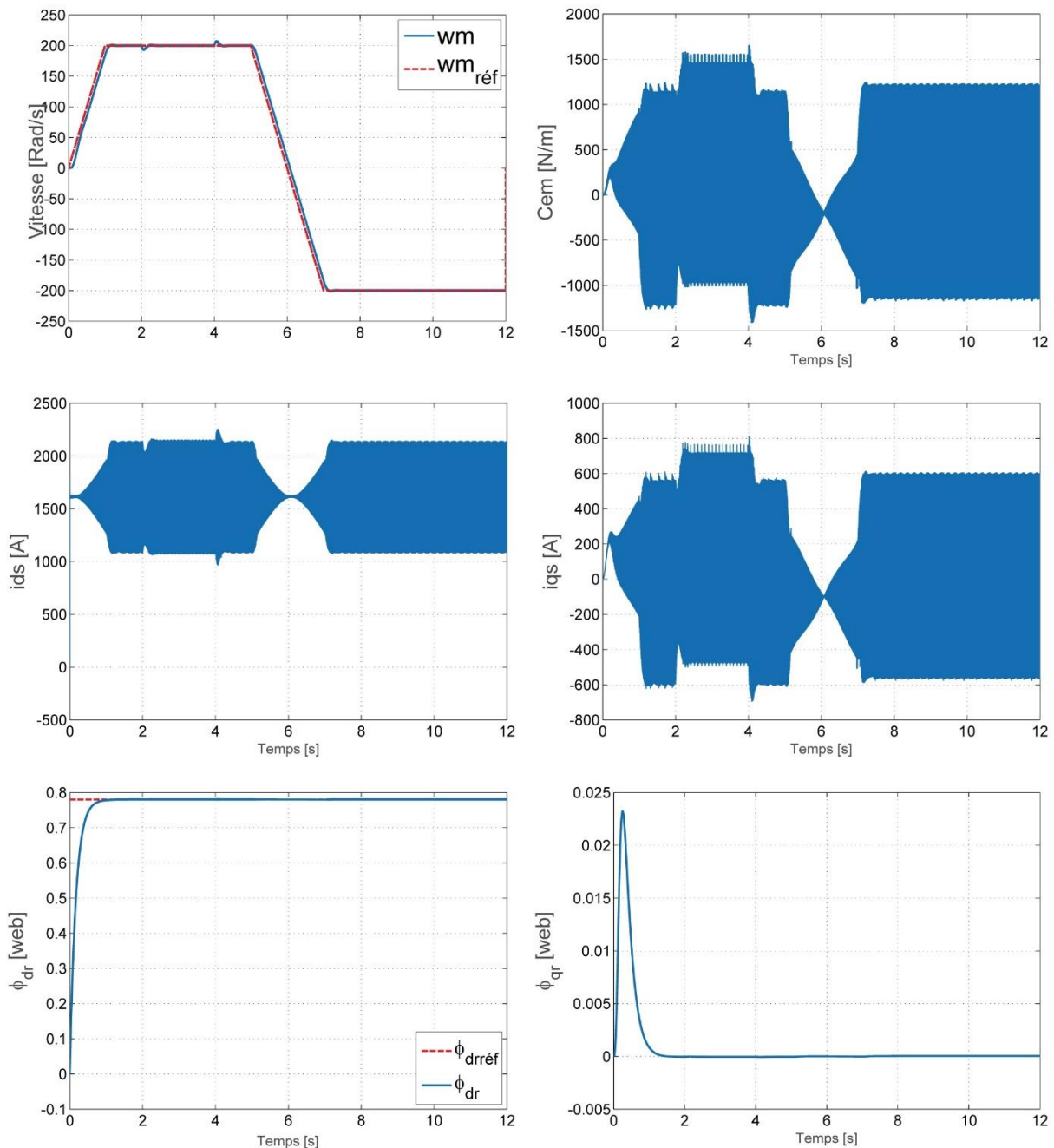


**Figure III-8 :** Résultat de simulation de la commande en vitesse de la MAS avec onduleur parfait (Application d'un couple de pente et inversement de sens de rotation ).



La **Figure III-9** présente résultat de simulation de la commande en vitesse de la MAS avec onduleur MLI, les résultats de simulations des réponses des courants ( $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ), le couple électromagnétique  $C_{em}$ , les flux rotorique  $\phi_{qr}$ ,  $\phi_{dr}$  et le flux de référence  $\phi_{dr}^*$ . Les résultats obtenus nous montrent l'efficacité de la méthode de découplage par compensation classique, montre que le réglage par un régulateur PI donne des résultats satisfaisants :

- La vitesse de rotation suit la vitesse de référence.
- Le courant est bien limité à sa valeur admissible.



**Figure III-9** : Résultat de simulation de la commande en vitesse de la MAS avec onduleur MLI (Application d'un couple de pente et inversement de sens de rotation ).

### **III.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle de la machine asynchrone triphasée par orientation du flux rotorique indirecte (IFOC).

Cette méthode nous a permis de maintenir parfaitement le découplage entre le couple et le flux, et rendre la machine asynchrone similaire à une machine à courant continu, rendant aussi la commande de vitesse facile.

Chapitre IV :  
Modélisation de la Pile  
à combustible  
type PEMFC

## Chapitre IV : Modélisation de la Pile à combustible type PEMFC

### IV.1 Introduction

Une pile à combustible est un convertisseur électrochimique qui convertit en continu l'énergie chimique d'un combustible et d'un comburant en énergie électrique, chaleur et autres produits de réaction. Le combustible et le comburant sont stockés à l'extérieur de la pile et transférés au fur et à mesure que les réactifs sont consommés. Ainsi le dimensionnement en énergie, déterminant notamment l'autonomie, dépend de la capacité du réservoir externe du combustible et du comburant. Cette caractéristique est l'une des différences avec une batterie d'accumulateur [62].

### IV.2 Historique

La paternité de la pile à combustible est attribuée traditionnellement à deux chimistes, le gallois William GROVE et le suisse Christian Schönbein. Le premier mit au point les premières cellules pour produire de l'électricité entre 1839 et 1842. Ces travaux ont suscité l'intérêt de nombreux scientifiques dont Christian Schönbein, spécialiste de la chimie de l'oxygène. Tous les ont échangé une correspondance nourrie pour expliquer ce qu'ils appelaient alors le phénomène inverse de l'électrolyse de l'eau, connu depuis 1800[63].

Après 1945, 3 groupes de recherche (aux Etats Unis, en Allemagne et en URSS) reprirent les études sur les principaux types de générateurs, en apportant les améliorations technologiques nécessaires à un développement " industriel ". Ces travaux ont débouché sur les concepts actuels, notamment chez Siemens et Pratt and Whitney (aujourd'hui dans le même groupe « que International Fuel Cell »).

Les premières applications " commerciales " des piles à combustible furent les programmes spatiaux du début des années 60, GEMINI, APPOLLO, Spacelab... pour lesquels furent développées des piles à membranes (General Electric), et des piles alcalines sous pression (Pratt and Wittney).

Depuis les années 1970, de nombreux efforts de recherche ont été entrepris par de très grosses entreprises industrielles, très souvent aidés par des fonds publics, dans le cadre de programmes nationaux ou multi nationaux de diversification énergétique ou de protection de l'environnement.

Le terme de pile à combustible se traduit en anglais par Fuel cell, c'est-à-dire cellule à combustible, dont l'acronyme est FC se retrouve dans la terminologie désignant la différente filière technologique. Ce mémoire traite la pile à combustible PEMFC (Proton exchange membrane fuel cell) pile à membrane échangeuse de protons [62].

### IV.3 Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un générateur électrochimique d'énergie permettant de transformer directement l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène, hydrocarbures, alcools,...) en énergie électrique sans passer par l'énergie thermique et/ou mécanique.

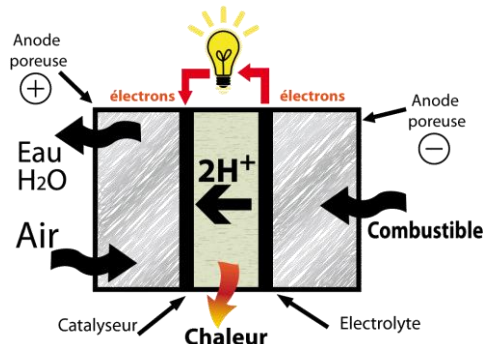


Figure IV-1 : Principe de fonctionnement

La pile à combustible fonctionne sur le monde inverse de l'électrolyse de l'eau. Ici, on supprime la source de tension, on alimente en hydrogène et oxygène et on constate l'apparition d'une tension électrique entre les deux électrodes : le dispositif est devenu un générateur électrique qui fonctionnera aussi longtemps qu'il sera alimenté. Pour cela elle est constituée de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte, matériau qui bloque le passage des électrons mais laisse circuler les ions. (Voir le schéma) Le combustible à base d'hydrogène  $H_2$  est amené sur l'anode.

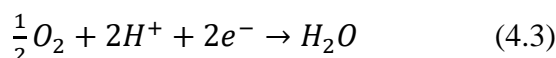
$H_2$  va se transformer en ions  $H^+$  et libérer des électrons selon la réaction :



Le comburant à base d' $O_2$  alimente la cathode de la pile.  $O_2$  va se transformer en ions  $O^{2-}$  selon la relation suivante :



Les ions  $H^+$  arrivent sur la cathode où ils se combinent aux ions  $O^{2-}$  pour former de l'eau.



C'est le transfert des ions  $H^+$  et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu à partir de l'hydrogène [62].

Ces réactions d'oxydation de l'hydrogène (à l'anode) et de réduction de l'oxygène (à la cathode) s'effectuent à l'interface électrolyte/électrode en présence d'un catalyseur (platine), en des points appelés « points triples » **Figure IV-2**

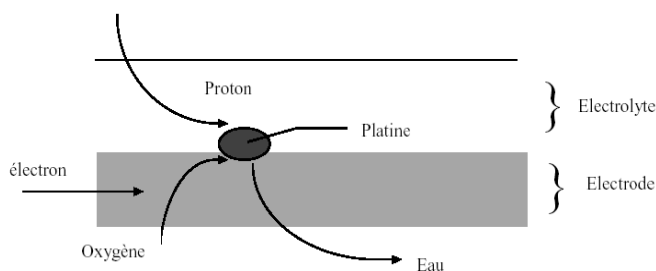


Figure IV-2 : Schéma d'une zone active de cellule de pile à combustible  $H_2/O_2$

## IV.4 Classification des technologies de piles à combustible

Il existe plusieurs technologies de piles dont les acronymes anglais sont explicités dans le tableau, ces piles se différencient selon la nature de leur électrolyte et le niveau de leur température de fonctionnement, leur architecture et les domaines d'application dans lesquels chaque type peut être utilisé. Par ailleurs, chaque pile a des exigences différentes en termes de combustibles.

Le **Tableau IV-1** décrit les six grandes catégories, leurs caractéristiques techniques et leurs applications. [64] , [65] , [66].

**Tableau IV-1** : Les types des piles à combustibles

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Gamme de température	Basse température			Haute température		
Nom	Alcalin Fuel Cell	Polymère Exchange Membrane Fuel Cell	Direct Methanol Fuel cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> et KCO <sub>3</sub> fondu dans une matrice LiAlO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> et Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Combustible	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	Méthanol	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)	H <sub>2</sub> (pur ou reformé)
Oxydants	O <sub>2</sub> (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Gamme de puissance	1w à 100kw	1kw à 10Mw	1w à 10Mw	1w à plusieurs kw	500kw à 10Mw	1kw à 100Mw
Rendement électrique	55-60%	35-45% +75% en cogénération	30 à 45%		50-60%	50-55% 75% en cogénération
Ions dans l'électrolyte	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité, Maritime	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU), Maritime

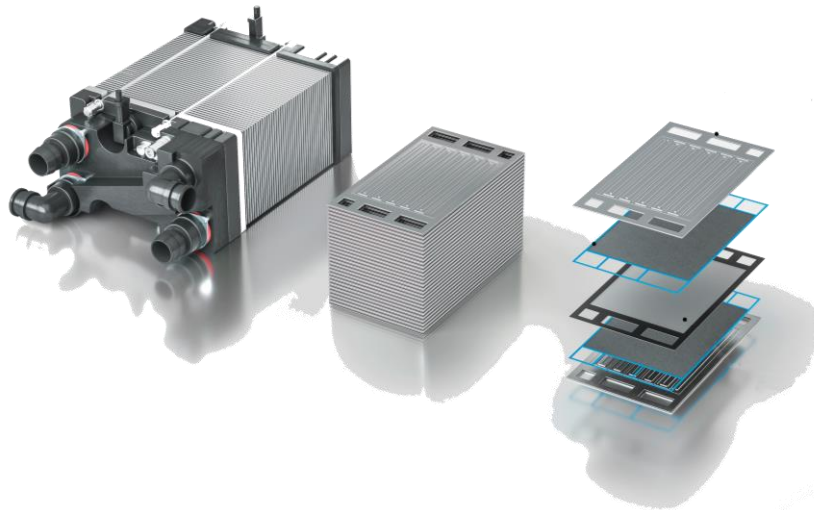
## IV.5 Piles à membrane électrolyte polymérique (PEMFC)

Les PEMFC (Proton Exchange Membrane fuel Cell) sont actuellement le type de pile le plus étudié. Leurs applications sont multiples autant dans le domaine automobile que dans le domaine stationnaire et portable. Si elles sont si populaires par rapport aux autres types de piles, c'est qu'elles présentent plusieurs avantages :

- Elles ne sont pas sensibles au CO<sub>2</sub> (comme l'est l'AFC) ;
- Sa température de fonctionnement est faible,
- Permettant un démarrage rapide,
- Meilleure gestion thermique (moins de chaleur à évacuer);
- Cependant, elles présentent encore des problèmes qui doivent être réglés :
- Elles sont très sensibles au CO ;
- Leur faible température de fonctionnement ne permet pas de bien valoriser la chaleur (notamment dans le cas d'applications stationnaires) ;
- Le catalyseur (Platine) coûte cher, de même que les plaques bipolaires et la membrane.

Dans la PEMFC, les électrodes sont à base de métaux précieux, surtout du platine, dont la teneur est de 0,1 à 1 mg/cm<sup>2</sup>. Il est sous forme de très fines particules sur du charbon actif à très grande surface spécifique. Les électrodes doivent permettre de dissocier l'hydrogène et le transfert des protons vers l'électrolyte [63].

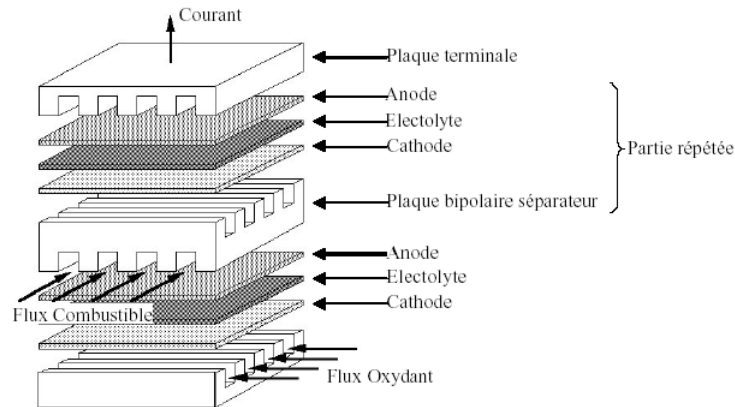
## IV.6 Constitution d'une pile à combustible



**Figure IV-3** : Stack d'une pile à combustible

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode membrane électrode (EME). Ces éléments vont être présentés plus en détail dans les parties suivantes.

La figure suivante représente la structure d'une cellule et d'un empilement [67].



**Figure IV-4 :** Structure d'un empilement des cellules PEMFC

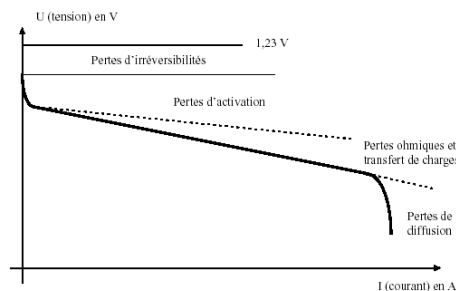
Chaque type de pile a sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes. Le cœur de la pile est constitué :

- des électrodes.
- de l'électrolyte.
- des plaques bipolaires.

L'agencement exact de ces composants entre eux ainsi que la nature des composants les constituant dépend du type de pile. Leur rôle reste cependant le même. Les deux réactions d'oxydo-réduction se font dans la zone dite de "contact triple". Dans cette zone se trouvent l'électrolyte (à travers lequel passent les espèces ioniques), les électrodes (ou plus précisément le catalyseur avec un apport ou un départ d'électrons) et l'arrivée des réactifs gazeux. Cette zone que l'on peut voir comme un espace à deux dimensions est primordiale pour le bon fonctionnement de la pile [62].

#### IV.6.1 Caractéristique électrique :

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. Les caractéristiques électriques d'une cellule de pile à combustible basse température sont décrites à la **Figure IV-5**. La tension à vide dite (tension de Nernst) est d'environ 1,23 V. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes (pertes d'activation et ohmique) : la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement (pertes de concentration) [62].



**Figure IV-5 :** Caractéristiques courant - tension d'une pile à combustible



## IV.7 Les applications des piles à combustible

La pile à combustible est applicable dans divers domaines, on cite ici quatre applications [63]:

### IV.7.1 Automobile

Les véhicules hybrides et les véhicules électriques ; les Véhicules particuliers et de golf, les bus (PEMFC, SOFC, AFC),

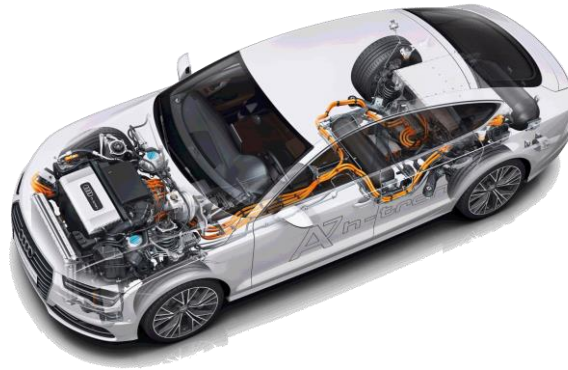


Figure IV-6 : Véhicule équipé d'une pile à combustible

### IV.7.2 Stationnaires

Génération de chaleur et d'électricité (résidentiel, bâtiments publics type piscine, hôpital, école, résidences, générateur de secours). Le type de pile le plus testé est PAFC, et aussi la PEMFC.

### IV.7.3 Maritimes

Elles peuvent être utilisées dans de petits bateaux à moteur et même dans des sous-marins. C'est une application relativement peu connue - et peu médiatisée - des piles, mais qui pourrait connaître un développement certain. Les piles les plus utilisées sont PEMFC, MCFC.

### IV.7.4 Portables

Téléphone, ordinateur portable, caméra, matériel de camping ou militaire. Les piles utilisées sont seulement PEMFC et DMFC car à leur faible température de fonctionnement.



Figure IV-7 : Un système à pile à combustible utilisé pour un téléphone portable

## IV.8 Modélisation de la PEMFC

Pour les piles à combustible avec un électrolyte conducteur de protons (PEMFC), l'hydrogène est oxydé à l'anode et les protons sont transportés à travers la membrane vers la cathode.

### IV.8.1 Modèle de tension

Il existe un grand nombre de modèles quasi statiques pour décrire la réaction chimique présente dans une cellule de pile à combustible. Dans le cadre de cette étude, le modèle d'évolution de la tension choisi est issu des travaux présentés par Amphlett [68].

Ce modèle est décrit en utilisant la combinaison des lois élémentaires et des modèles empiriques. Dans le développement des modèles élémentaires, les transports de matière sont pris en compte via les équations de Maxwell. Les potentiels d'équilibre thermodynamique sont définis en utilisant l'équation de Nernst. Les surtensions d'activation sont calculées par les équations de Tafel [68]. La résistance interne est déterminée par les équations de Nernst-Planck [68]. En utilisant la loi d'Ohm, nous pouvons exprimer la tension de cellule par [62] :

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad [V] \quad (4.4)$$

### IV.8.2 Tension de Nernst :

$E_{Nernst}$  dite tension réversible : est le potentiel d'équilibre thermodynamique défini en utilisant l'équation de Nernst.

$$E_{nerst} = \frac{\Delta G}{2.F} + \frac{\Delta S}{2.F} (T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F} [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (4.5)$$

Où

- $\Delta G$  : Est le changement d'énergie libre (J/mol).
- $F$  : est la constante de faraday (96,487 C/Kmol).
- $\Delta S$  : est le changement d'entropie (J/mol).
- $R$  : est la constante universelle du gaz (8,314 J/K.mol).
- $P_{H_2}, P_{O_2}$  : sont respectivement les pressions partielles d'hydrogène et l'oxygène (atm).
- $T$  : indique la température de fonctionnement de la pile (K).
- $T_{ref}$  : est la température de référence (K).

En utilisant les valeurs standards de la température et de la pression (SPT) L'équation peut être simplifiée comme suit:

$$E_{nerst} = 1,229 - 0,85 \cdot 10^{-3} (T - 298,15) + 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2})] \quad (4.6)$$

Il faut noter que la température de la membrane et les pressions partielles du gaz varient en fonction du courant : avec l'augmentation du courant les pressions d'hydrogène et de l'oxygène diminuent, bien que la température augmente.

Les pertes, appelées souvent polarisation, proviennent principalement de trois sources : la polarisation d'activation ( $V_{act}$ ), la polarisation ohmique ( $V_{ohm}$ ), et de la polarisation de concentration ( $V_{conc}$ ). Ces pertes entraînent, pour une pile de potentiel idéal  $E_{Nernst}$ , une chute de la tension :

$$V = E_{Nernst} - pertes \quad [62].$$

### IV.8.3 Polarisation d'activation (Charge transfert kinetics)

La polarisation d'activation est donnée par la relation de Tafel [68]:

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(Co_2) + \xi_4 \ln(I_{stack})] \quad (4.7)$$

Avec :  $I_{stack}$  est le courant de fonction de la pile, les  $\xi$  représentent les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile, ces valeurs sont définies par des équations de la thermodynamique et d'électrochimie dans [64],  $Co_2$  est la concentration de l'oxygène dans l'interface du catalyseur de la cathode donnée par la relation [69]:

$$Co_2 = \frac{Po_2}{5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{(-498/T)}}$$

### IV.8.4 Polarisation ohmique

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance que rencontre le flux d'ions en traversant la membrane et à la résistance que rencontrent les électrons dans les électrodes et le circuit électrique. La membrane et les électrodes obéissant à la loi d'Ohm, on peut exprimer les pertes ohmiques par l'équation suivante :

$$V_{ohmic} = I_{stack} \cdot (R_m + R_c) \quad (4.8)$$

Avec  $R_m$  est la résistance équivalente de la membrane pour le flux d'électron, elle est calculée par la relation :

$$R_m = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (4.9)$$

Où  $\rho_M$  est la résistivité spécifique de la membrane pour le flux d'électron,  $A$  est la surface active de la pile en (cm<sup>2</sup>), et  $l$  est la largeur de la membrane en (cm).

Dans ce travail on a considéré que la membrane est en Nafion [64].

$$\rho = \frac{181,6 \cdot \left[ 1 + 0,03 \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) + 0,062 \cdot \left( \frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[ \psi - 0,634 - 3 \cdot \left( \frac{I_{stack}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[ 4,18 \cdot \left( \frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (4.10)$$

**IV.8.5 Polarisation de concentration (Mass Transport)**

La polarisation de concentration est donnée par la relation suivante [69] , [68] , [62]:

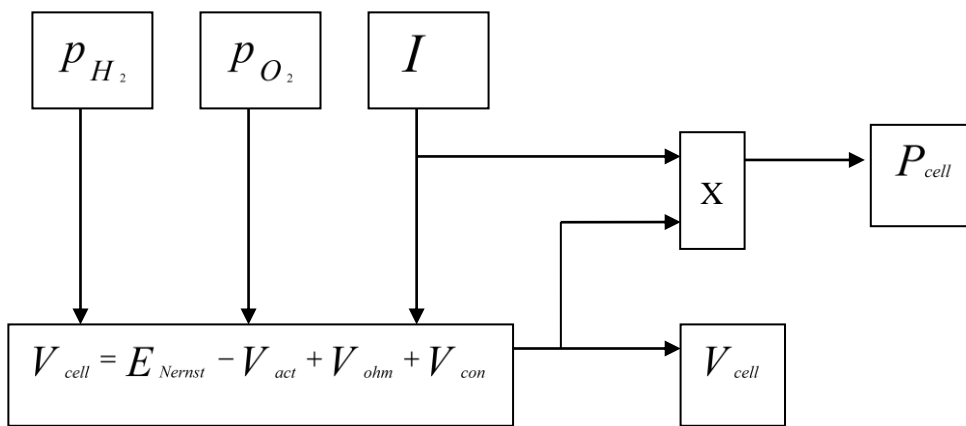
$$V_{con} = -B \cdot \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \tag{4.11}$$

Avec :

$J_{max}$  est la densité du courant limite (A/cm<sup>2</sup>)

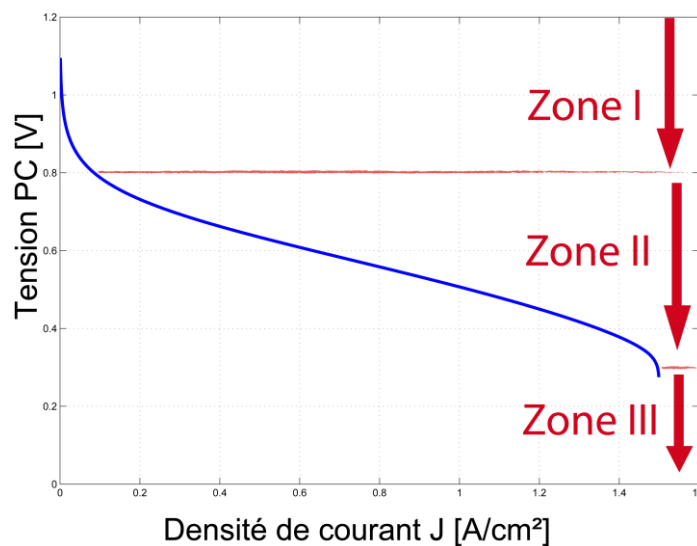
$B = \frac{RT}{n.F}$  Désigne la constante électrochimie (V)

**IV.8.6 Model final de tension**



**Figure IV-8** : modèle statique simplifié de la pile à combustible (PEMFC)

Cette loi de tension **Figure IV-8** permet de décrire la courbe caractéristique tension/densité de courant d’une cellule de pile à combustible PEMFC en **Figure IV-9**.

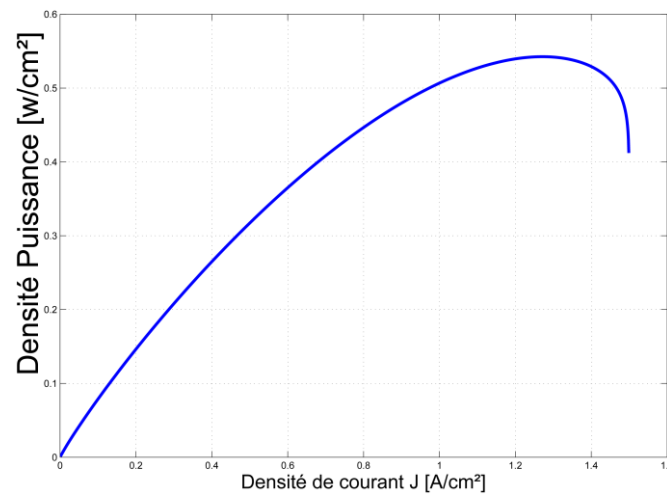


**Figure IV-9** : Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par cellule)

Nos résultats montrent que cette caractéristique peut être décomposée en trois phénomènes prépondérants en fonction de la valeur de la densité de courant.

- La première zone représente la surtension d'activation anode et cathode qui est le phénomène le plus important pour les faibles densités de courant.
- La deuxième zone caractérise le comportement ohmique de la cellule, c'est la zone la plus utilisée en fonctionnement car elle est linéaire et elle est valable sur une forte plage de variation de la densité de courant.
- La troisième zone liée à la polarisation de concentration.

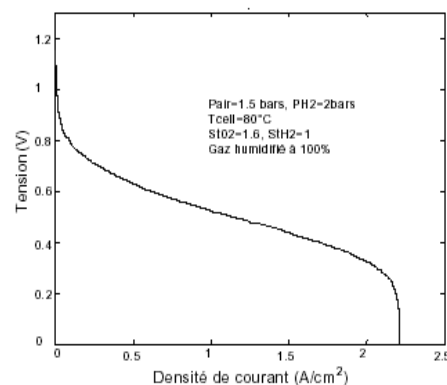
La puissance est définie comme le produit entre le courant et la tension. Elle permet de décrire la courbe Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (par cellule).



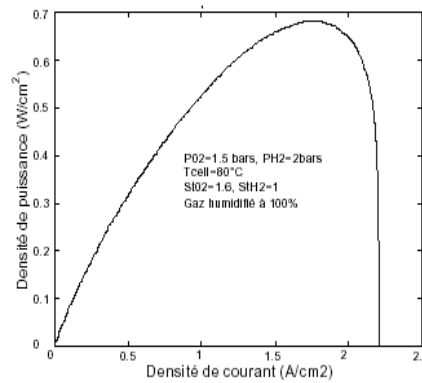
**Figure IV-10 :** Caractéristique densité de Puissance /Densité de courant (tension par cellule)

Nos résultats obtenus sont conformes à ceux qui sont obtenus par d'autres auteurs. A titre d'exemple nous présentons les résultats donnés par Jérôme LACHAIZE[62].

Qui a utilisé un modèle proche de ce modèle pour comparaison avec **Figure IV-11** et **Figure IV-12** consécutivement.



**Figure IV-11:** Caractéristique Tension/Densité de courant (tension par cellule)



**Figure IV-12 :** Caractéristique densité de Puissance / Densité de courant (tension par cellule)

## IV.9 Dimensionnement du stack Pile à Combustible

Le dimensionnement du stack consiste à déterminer le nombre et la surface des cellules qui composent un stack de piles à combustible. Ce dimensionnement doit tenir compte de la puissance nominale de la pile et de la densité de courant que nous souhaitons avoir.

### IV.9.1 Détermination du nombre de cellules.

La puissance électrique brute de l'empilement se calcule par la relation suivante :

$$P_{pile} = N.V_{FC}.J.A \quad (4.12)$$

$P_{pile}$  : Puissance électrique brute du stack (W)

$N$  : Nombre de cellules de l'empilement

$V_{FC}$  : Tension par cellule (V)

$J$  : Densité de courant (A/m<sup>2</sup>)

$A$  : Surface active des cellules (m<sup>2</sup>).

$V_{FC}$  et  $J$  sont liés par la caractéristique tension/courant de la pile, il reste donc trois variables indépendantes à ajuster de façon à obtenir la puissance souhaitée. Les contraintes liées à l'application vont nous permettre de faire les choix nécessaires.

Il est intéressant d'avoir la tension  $U_{stack} = N.V_{FC}$  la plus élevée et donc le courant

$I = J.A$  le plus faible possible car cela limite les pertes joule dans la cellule.

Pour satisfaire cette contrainte, il est possible :

- D'augmenter le nombre de cellules jusqu'à la limite technologique actuelle.
- D'augmenter la tension par cellule, en diminuant la densité de courant donc en augmentant la surface de cellule. Ce choix va en outre dans le sens d'un bon rendement de pile.

Comme le montre la **Figure IV-10** il est intéressant d'avoir des densités de puissance élevées (pour réduire l'encombrement et le coût/kW de la pile). Cela passe par une faible surface de cellule, donc des densités de courant élevées. Cette contrainte s'oppose à l'objectif d'avoir une tension par cellule élevée. Une trop forte densité de courant conduit de plus, à un rendement faible et donc à

une puissance thermique à évacuer élevée, ce qui posera des problèmes pour le système. Une limite raisonnable pour la densité de courant est de 0.6 A/cm<sup>2</sup> ce qui correspond à une tension de  $V_{FC}=0.64V$  **Figure IV-9**, mais il s'agit d'une valeur arbitraire qu'il faudrait valider par une étude technico-économique.

#### IV.9.2 Détermination de la surface des cellules

Il est maintenant possible de déterminer les autres paramètres de l'empilement:

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{U} \quad (4.13)$$

$$A = \frac{I_{\max}}{J} \quad (4.14)$$

### IV.10 Conclusion

Le modèle statique proposé dans ce chapitre nous a permis de décrire : la courbe caractéristique tension/densité de courant d'une cellule de pile à combustible PEMFC et la courbe caractéristique densité de puissance/courant (par cellule). Ce qui nous a permis de dimensionner la pile qui fournit l'énergie électrique nécessaire pour alimenter les moteurs de notre véhicule électrique.

Chapitre V :  
Simulation et commande  
d'une chaîne de  
tractions bimoteurs



## Chapitre V : Simulation et commande d'une chaîne de tractions bimoteurs

### V.1 Introduction

Certaines applications des actionneurs électriques nécessitent l'utilisation de plusieurs machines électriques. Il y a principalement deux raisons pour un tel choix : soit une seule machine électrique est trop encombrante (du point de vue volumique ou du point de vue de la puissance), soit il faut commander plusieurs éléments à l'aide de différents actionneurs.

La structure du système de propulsion proposée est semblable à celle d'un système multi-machines multi-convertisseur. On définit ce dernier comme étant un système formé par plusieurs actionneurs électrique couplés entre eux mécaniquement (véhicules électriques) [34].

L'architecture du système de propulsion considéré permet de développer un différentiel électronique assurant aux roues motrices une synchronisation de vitesse lors du roulement. Le véhicule est propulsé par deux moteurs électriques il devient intelligent et moins encombrant.

### V.2 Modélisation de la partie mécanique de la chaîne de traction électrique

Dans notre cas de chaîne de traction du véhicule électrique il est très difficile de modéliser la partie mécanique de l'installation. Le système est très complexe (réducteur, interaction entre roue-sol) et enfin la charge est mal connue (pénétration dans l'air) [34], [2].

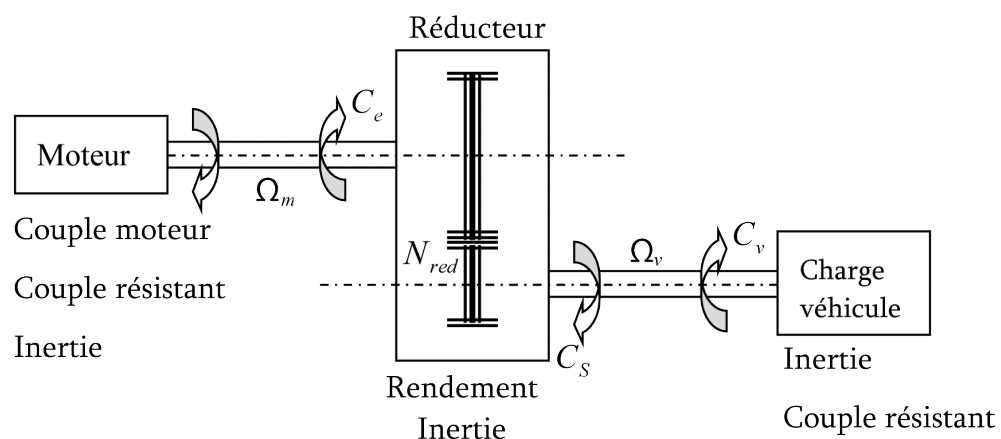


Figure V-1 : Partie mécanique de la chaîne de traction électrique.

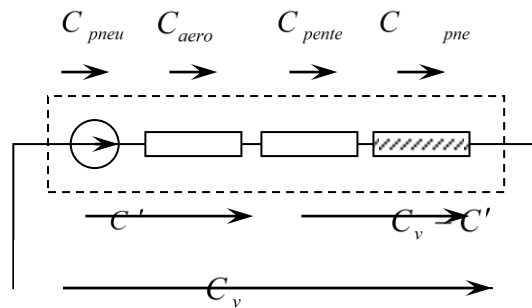
### V.2.1 Charge véhicule

Vu de l'arbre conduisant à la roue, la charge automobile se caractérise par un certain nombre de couples pour la plupart résistants [34] et [54], l'un d'entre eux pouvant être moteur dans certaines circonstances (couple inertiel).

- Le couple lié à l'inertie du véhicule,
- Le couple aérodynamique : c'est le couple qui correspond à la résistance à la pénétration dans l'air,
- Le couple lié à la pente : il est lié au poids du véhicule,
- Le couple de résistance au roulement, c'est le couple qui correspond à la résistance à la déformation du pneu.

Dans ce qui suit, on définit chacun de ces couples.

Le schéma électrique équivalent de cette charge est donné en **Figure V-2**



**Figure V-2** : Schéma électrique équivalent de la charge véhicule

- **Le couple inertiel  $C_{in}$**

Le couple inertiel est lié à la masse du véhicule, il est défini par la relation :

$$C_{in} = J_v \cdot \frac{dw_r}{dt} \quad (5.1)$$

Le moment d'inertie se calculant par l'expression :

$$J_v = MR_r^2 \quad (5.2)$$

- **Le couple aérodynamique  $C_{aero}$**

La force de frottement due à la pénétration dans l'air s'exprime de la manière suivante :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho S C_x V_h^2 \quad (5.3)$$

(avec  $w_r$  la vitesse angulaire des roues)

En posant :

$$k_{aero} = \frac{1}{2} \rho S C_x R_r^3 \quad (5.4)$$

On obtient finalement le couple aérodynamique :

$$C_{aero} = k_{aero} \cdot w_r^2 \quad (5.5)$$

• **Le couple lié à la pente**  $C_{pente}$

La composante du poids de la voiture entrant en compte dans le bilan mécanique (composante tangentielle) s'écrit :

$$F_{pente} = M \cdot g \cdot \sin \alpha \tag{5.6}$$

Le couple résistant correspondant s'écrit :

$$C_{pente} = M \cdot g \cdot \sin \alpha R_r \tag{5.7}$$

• **Le couple de résistance au roulement**  $C_{pneu}$

Ce couple est celui qui correspond la déformation du pneu. C'est par exemple lui qui empêche une voiture au point mort d'avancer sur un plan très faiblement incliné. La force maximale qui peut être opposé au mouvement par le pneu a pour expression :

$$F_{max} = M \cdot g \cdot f_{rr} \tag{5.8}$$

Le coefficient de résistance au roulement dépend du pneu utilisé ainsi que du revêtement de la route. On en déduit le couple maximal correspondant :

$$C_{max} = M \cdot g \cdot f_{rr} \cdot R_r \tag{5.9}$$

On trouve expérimentalement que le couple de résistance au roulement effectif est défini par rapport à ce couple maximum de la manière suite :

-Si la vitesse est strictement positive, alors  $C_{pneu} = C_{max}$

-Si la vitesse est strictement négative, alors  $C_{pneu} = -C_{max}$

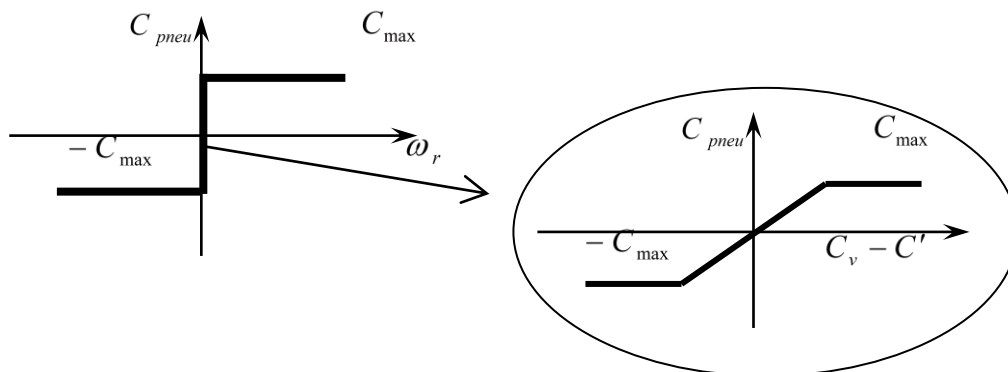
-Si la vitesse est nulle, alors le problème se divise en trois sous – cas impliquant les autres couples qui s'appliquent sur le véhicule :

– Si  $C_v - C' \leq C_{max}$  alors  $C_{pneu} = C_{max}$  (5.10)

– Si  $C_v - C' \geq -C_{max}$  alors  $C_{pneu} = -C_{max}$  (5.11)

– Sinon  $C_{pneu} = C_v - C'$  (5.12)

La **Figure V-3** résume la définition du couple de résistance au roulement.



**Figure V-3** : Couple de résistance au roulement.

### V.2.2 modèle du réducteur

Le réducteur est placé en bout d'arbre moteur. Il assure une transformation de couple et de vitesse entre le moteur et les roues. On le décompose en plusieurs éléments possédant chacun des caractéristiques propres :

- Une partie assurant la transformation de couple et de vitesse tout en faisant intervenir un rendement.
- Une inertie

La partie transformation n'est pas linéaire, du fait de la présence d'un rendement pour le réducteur. Pour simplifier, nous prendrons un rendement constant issu des mesures faites par la société **Leroy-Somer** [70]. ( $\eta = 98\%$ )

Les vitesses d'entrée et de sortie ne pouvant pas être différentes, le rendement a une influence sur le couple. Ainsi, on détermine le couple d'entrée en fonction du couple de sortie de la manière suivante :

$$\text{Si } C_s w_s > 0 \text{ alors } C_e = r \frac{1}{\eta} C_s$$

$$\text{Si } C_s w_s < 0 \text{ alors } C_e = r \eta C_s$$

$$\text{Si } w_s = 0 \text{ alors } C_e = r C_s$$

avec  $C_s, C_e, w_s$  et  $w_e$  les couples et vitesses d'entrée et de sortie.

On obtient finalement le couple résistant total [34] , [2]:

$$C_v = C_{pente} + C_{pneu} + C_{aero} \quad (5.13)$$

La **Figure V-4** représente les couples résistants à l'avancement de véhicule sur une voie horizontale

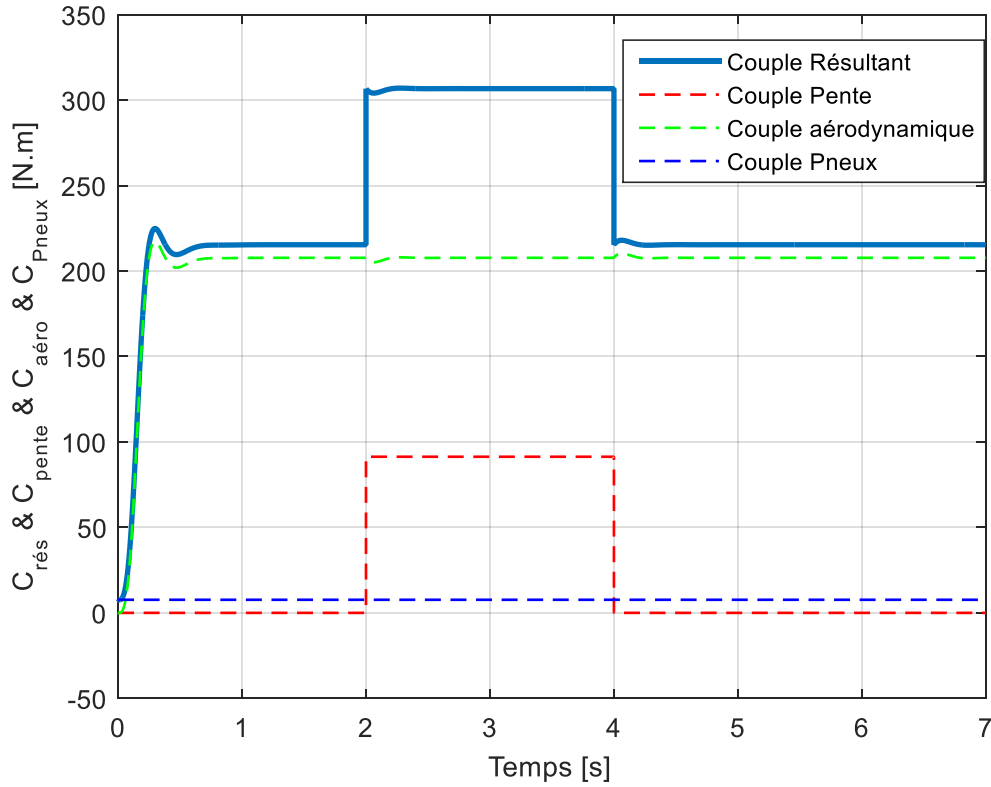


Figure V-4 : Couples résistants a l'avancement de véhicule

Pour avancer un véhicule électrique sur une chaussée, il faut que l'effort moteur soit supérieur à l'effort résistant. Le mécanisme pour lequel l'effort moteur entraîne la propulsion du véhicule est bien connu : le moteur fait tourner les roues motrices qui entraîneraient le véhicule. Les roues motrices ne peuvent glisser sur la route à cause du frottement entre pneumatique et chaussée se qui les obligent à rouler.

Le moteur électrique doit développer un couple supérieur au couple résistant imposé par le déplacement du véhicule.

Les équations qui régissent ce mouvement sont :

$$C_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} + f_c \Omega_m + C_e \tag{5.14}$$

$$C_s = J_v \frac{d\Omega_v}{dt} + C_v \tag{5.15}$$

$$C_e = \frac{1}{\eta N_{red}} C_s \tag{5.16}$$

$$\Omega_v = \frac{\Omega_m}{N_{red}} \tag{5.17}$$

En reportant (5.15) et (5.17) dans (5.16) nous obtenons l'équation :

$$C_e = \frac{J_v}{\eta N_{red}^2} \frac{d\Omega_m}{dt} + \frac{1}{\eta N_{red}} C_v \tag{5.18}$$

qui, combinée avec (5.14) donne :

$$J_e \frac{d\Omega_m}{dt} + f_c \Omega_m = C_m \frac{1}{\eta N_{red}} C_v \quad (5.19)$$

où  $J_e$  est l'inertie équivalente ramenée en amont du réducteur.

$$J_e = J + \frac{J_v}{\eta N_{red}^2} \quad (5.20)$$

L'équation mécanique de la chaîne de traction est obtenue par le modèle décrit précédemment (le modèle (5.19) de la partie mécanique).

$$J \frac{dw_m}{dt} + f_c \cdot w_m = P(C_{em} - C_r) \quad (5.21)$$

Avec

$$C_{em} = \frac{P \cdot L_m}{L_r} (\phi_{dr} \cdot I_{qs} - \phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (5.22)$$

$$C_r = \frac{1}{\eta N_{red}} C_v \quad (5.23)$$

### V.2.3 Modélisation du véhicule électrique

Le modèle de véhicule sera obtenu sous les hypothèses simplificatrices usuelles, savoir :

#### ❖ Les roues sans glissement latéral

Nous étudierons le cas où les roues avant sont seules directrices, les roues arrière sont motrices ;

#### ❖ Géométrie du véhicule

la figure 4.4 présente le modèle géométrique du véhicule. Seuls trois paramètres sont utiles, soit la distance entre les roues motrices  $d$ , le rayon des roues motrices  $R_r$  et l'empattement du véhicule  $l_w$  le tableau en donne les valeurs numériques.

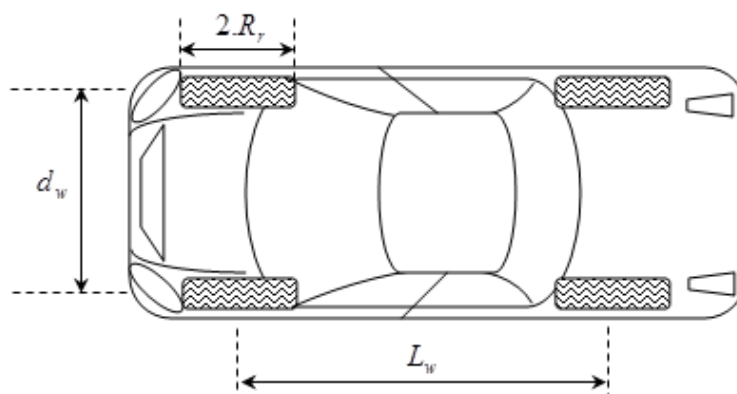


Figure V-5 : Géométrie du véhicule

Tableau V-1 : Paramètres géométriques du véhicule (29,30,33)

Description	symbole	Valeur numérique
Empâtement du véhicule	$l_w$	2,5 m
Distance entre les roues motrices	$d$	1,5 m
Rayon des roues motrices	$R_r$	0,26 m

### ❖ Modèle cinématique

La cinématique est l'étude des mouvements sans se préoccuper des causes qui leur donnent naissance (forces) [3].

L'angle entre le vecteur  $V_R$  et l'axe longitudinal du véhicule s'appelle l'angle de glissade du véhicule, qui est en général identique avec l'angle de direction  $\delta$ , un coefficient de proportionnalité ( $k=0.69$ ) entre ces deux angles est défini [34], [54] et [53]:

$$\beta = k \cdot \delta \quad (5.24)$$

La distance CG peut être exprimée de la manière suivante :

$$CG = \frac{RG}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{GF}{\operatorname{tg}\delta} \quad (5.25)$$

Ce qui permet d'obtenir :

$$RG = GF \cdot \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\delta} \quad (5.26)$$

$$\text{De plus : } RG + GF = l_w \quad (5.27)$$

On en déduit les expressions de  $RG$  et  $GF$  en fonction de  $L_w$ ,  $\delta$  et  $\beta$  :

$$RG = \frac{l_w}{1 + \frac{\operatorname{tg}\delta}{\operatorname{tg}\beta}} = l_w \cdot \frac{\cos \delta \cdot \sin \beta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (5.28)$$

$$GF = \frac{l_w}{1 + \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\delta}} = l_w \cdot \frac{\cos \beta \cdot \sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (5.29)$$

Les rayons de braquage  $\rho_R$  et  $\rho_F$  sont donnés par :

$$\rho_R = \frac{RG}{|\sin \beta|} = l_w \cdot \frac{\cos \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (5.30)$$

$$\rho_F = \frac{GF}{|\sin \delta|} = l_w \cdot \frac{\cos \beta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (5.31)$$

$$CG = \rho_G = \rho_R \cdot \cos \beta = \rho_\delta \cdot \cos \delta \quad (5.32)$$

La vitesse de rotation instantanée peut s'écrire :

$$\theta = \frac{V_R}{\rho_R} = \frac{V_F}{\rho_F} = \frac{V_h}{\rho_G} \quad (5.33)$$

Les équations du mouvement en R sont obtenues de manières géométriques :

$$x_R = V_R \cdot \cos(\theta + \beta) \quad (5.34)$$

$$y_R = V_R \cdot \sin(\theta + \beta) \quad (5.35)$$

$$\theta = V_R \cdot \frac{\sin(\delta + \beta)}{l_w \cdot \cos \delta} \quad (5.36)$$

$$\omega = \dot{\theta} \quad (5.37)$$

Les vitesses au point R sont données par :

$$V_R = \frac{V_{Rr} + V_{Rl}}{2} \quad (5.38)$$

$$\omega = \frac{V_{Rr} - V_{Rl}}{d} \quad (5.39)$$

Les équations suivantes sont utilisées pour retrouver les différents paramètres cinématiques du véhicule. A partir des équations précédentes, on peut déterminer les vitesses linéaires des roues motrices :

$$V_{Rr} = V_R + \Delta V \quad (5.40)$$

$$V_{Rl} = V_R - \Delta V \quad (5.41)$$

avec :

$$\Delta V = \frac{d_w \sin(\delta + \beta)}{2 l_w \cos \delta} \cdot V_R \quad (5.42)$$

En général, les expressions des vitesses des roues motrices sont reformulées comme suite :

$$\begin{aligned} V_{Rr} &= V_R + k_\delta \cdot \Delta V \\ V_{Rl} &= V_R - k_\delta \cdot \Delta V \end{aligned} \quad (5.43)$$

avec  $k_\delta = \pm 1$  correspond à un choix de braquage des roues, à droite(-1) ou à gauche (+1) .

Les vitesses linéaires des roues :



$$V_{Rr} = \omega_{Rr} \cdot R_r \quad (5.44)$$

$$V_{Rl} = \omega_{Rl} \cdot R_r \quad (5.45)$$

Les vitesses angulaires des roues motrices s'écrivent [54] , [45] et [53] :

$$\begin{aligned} \omega_{Rr} &= \omega_R + k_\delta \cdot \Delta\omega \\ \omega_{Rl} &= \omega_R - k_\delta \cdot \Delta\omega \end{aligned} \quad (5.46)$$

Avec :

$$\Delta\omega = \frac{\Delta V}{R_r} = \frac{d\omega \sin(\delta + \beta)}{2 l_w \cdot \cos \delta} \cdot \frac{V_R}{R_r} = \frac{d\omega \sin(\delta + \beta)}{2 l_w \cdot \cos \delta} \cdot \omega_R \quad (5.47)$$

$\Delta\omega$  : la variation de vitesse angulaire (nulle en ligne droite).

L'équation (5.43) montre bien que la variation de vitesse des roues motrices est imposée par la trajectoire. Le cas particulier de la ligne droite, ou les deux roues parcourent des trajectoires identiques, la variation de vitesse est nulle. Donc les vitesses de rotation sont égales.

Le fonctionnement de différentiel est illustré par les équations (5.43) et (5.47).

#### V.2.4 Différentiel électronique

Les technologies développées pour les moteurs et l'électronique associée, permet d'envisager des véhicules électriques à transmissions aux deux roues. La miniaturisation autorise dans certain cas, la mise en place des moteurs électriques dans les roues. On élimine alors tous les dispositifs mécaniques de transmission, au profit d'une gestion électronique de leur fonction [34] , [45] , [71].

Bien qu'une transmission conventionnelle soit conservée dans la plupart des cas, c'est-à-dire moteur/réducteur/différentiel, la structure globale d'un véhicule électrique va vers la simplicité. Plus c'est simple, plus c'est léger, moins consomme d'énergie [52].

La transmission à un moteur par roue (même s'ils ne sont pas directs) permet un contrôle indépendant des roues qui doit offrir un meilleur comportement routier [72].

L'allégement de la chaîne de traction passe plutôt par l'augmentation de la vitesse de rotation des moteurs et donc l'utilisation d'un réducteur [34].

La **Figure V-6** représente une transmission complète avec les deux moteur-roues.



**Figure V-6** : Transmission complète avec les deux moteur- roues

### V.2.5 Commande de roues motrices d'un véhicule électrique

Dans notre étude, on propose une structure de commande des vitesses  $\Omega_{m_R}$  et  $\Omega_{m_L}$  des roues motrices basée sur la structure de la commande «machines indépendantes». Cette structure permet d'imposer deux références de vitesse  $\Omega_{m_R} \neq \Omega_{m_L}$  (dans un virage par exemple) aux deux processus, le couple à appliquer sur chacune est différent  $C_{m_R} \neq C_{m_L}$  (dans un virage, par exemple, les deux processus ne reçoivent pas la même référence de couple, il est donc impossible d'imposer la même référence de vitesse) [34].

La structure étudiée autorise des références différentes sur les processus et demande deux convertisseurs statiques indépendants pour le réglage.

Le contrôle de vitesse de roues motrices permet de réaliser un différentiel électronique.

La stratégie de ce véhicule vise à répartir les forces de traction sur les deux moteurs. Afin d'utiliser des machines identiques, une équi-répartition de puissance est judicieuse. Ce critère implicite mène à une commande à critère de répartition pour la partie mécanique, ou chaque moteur est contrôlé pour produire la moitié de la force de traction totale [34].

Le couplage mécanique est résolu par un critère d'équi-répartition des forces de traction. Cependant la prise en compte du contact roues/sol, pose un nouveau problème qui peut être associé au couplage mécanique. En effet, la loi de contact est mal connue, non linéaire et non stationnaire. L'ensemble de ces phénomènes (couplage mécanique et patinage), peuvent induire des couples résistants différents pour les machines à cause de patinage.

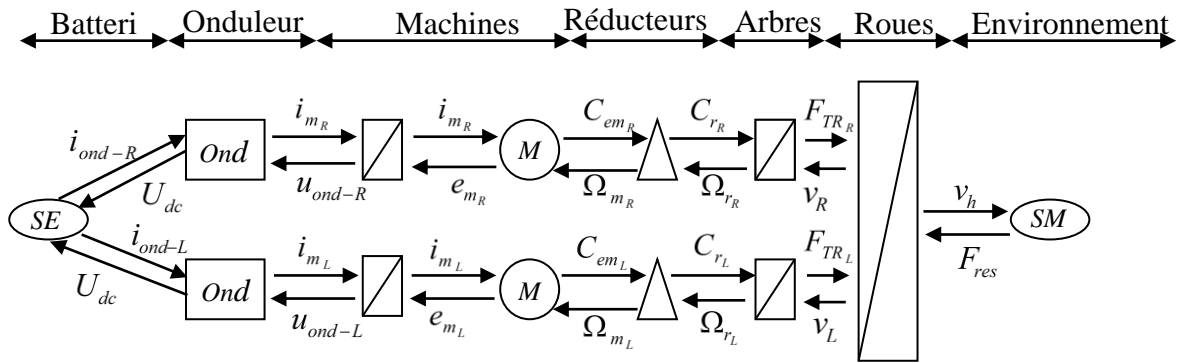
Contrôler les vitesses des roues motrices et donc une première pas dans la réalisation d'un anti-patinage, mais la structure de commande étudiée qui réalise le différentiel électronique ne permet pas de réaliser encore l'anti-patinage. En ce limitera à l'étude de différentiel électronique. Nous utilisons dans cette partie une représentation énergétique macroscopique qui doit permettre une

vision synthétique et mettre ainsi en évidence les interactions entre les diverses composantes de puissance utilisées.

**V.2.5.(a) Représentation énergétique macroscopique du différentiel électronique**

Une représentation énergétique macroscopique de ce système de propulsion à été proposé pour obtenir une vision global du différentiel électronique.

Cette représentation est illustrée par la **Figure V-7** [54] , [72].



**Figure V-7** : Représentation énergétique macroscopique du différentiel électronique.

Le système proposé comprend deux machines asynchrones. Elles assurent l'entraînement de deux roues motrices arrière.

• **Source électrique**

La source électrique (SE) est assimilée à une batterie d'accumulation de type Lithium-Ions délivrant la tension continue d'alimentation  $U_{dc}$ .

• **Source mécanique**

Nous avons choisi de considérer l'environnement du véhicule comme la source mécanique SM. Elle produit une force de résistance à l'environnement  $F_{res}$  qui dépend principalement de la pente du trajet, de la résistance au roulement et de la résistance aérodynamique. Cette force dépend de la vitesse de déplacement du véhicule qui constitue alors une entrée de perturbation pour cette source mécanique.

• **Le convertisseur électrique**

Le convertisseur électrique correspond à l'onduleur à MLI. Pour une modélisation aux valeurs moyennes, on peut le décrire par les équations suivantes :

$$\begin{cases} u_{ond} = m_{ond}^t \cdot U_{dc} \\ i_m = m_{ond} \cdot i_{ond} \end{cases} \quad (5.47)$$

Avec :

$U_{dc}$  : Tension imposée par la source d'alimentation.

$U_{ond}$  : Tension imposée à la machine (produite par l'onduleur).

$i_{ond}$  : courant absorbé par la source.

$i_m$  : Courant imposée à la machine (produite par l'onduleur).

$m_{ond}$  : Fonctions de connexions (ordre de commutation).

• **Convertisseur mécanique**

Nous proposons une modélisation de la partie mécanique, réducteur de vitesse est considéré comme un convertisseur mécanique permet d'adapter la vitesse de rotation de la machine  $\Omega_m$  à la vitesse de rotation de la roue  $\Omega_r$ , au travers un rapport de réducteur  $N_{red}$ . cet élément définit aussi le couple de réducteur à partir de couple de la machine  $C_{em}$ .

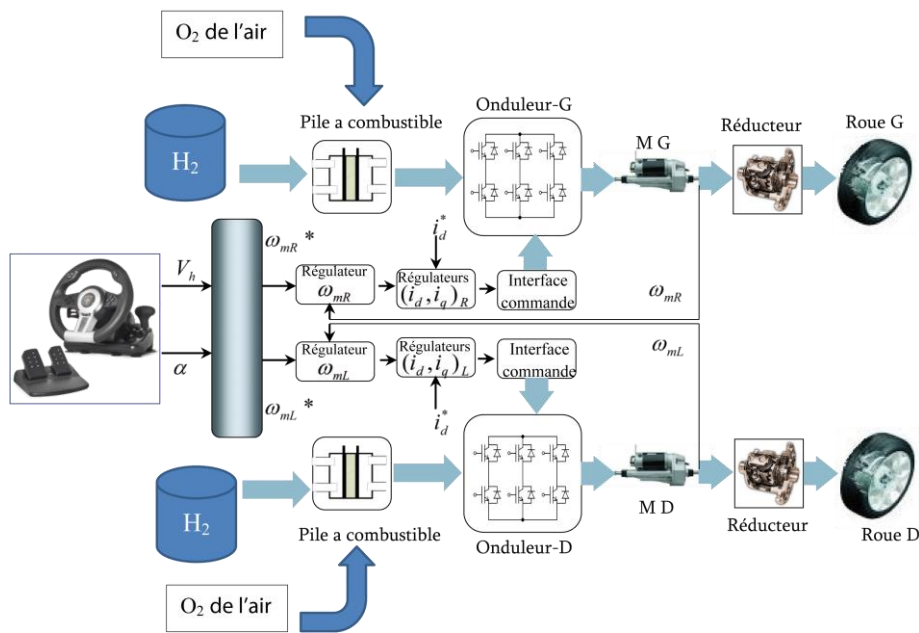
$$\begin{cases} \Omega_m = N_{red} \cdot \Omega_r \\ C_r = N_{red} \cdot C_m \end{cases} \quad (5.48)$$

**V.2.5.(b) Système de propulsion électrique utilisé**

Le système de base étudié est présenté par la **Figure V-8**, est un véhicule électrique à double chaîne de traction (version multimoteur). Les deux moteurs sont intégrés dans les roues et permettent d'entraîner celles-ci via des réducteurs de vitesse. Il peuvent aussi bien assurer la charge de la batterie en mode de générateurs [44], [45], [71], [50].

Le schéma général de la commande de roues motrices est représenté par la **Figure V-8**. Le bloc de consigne doit fournir les références de vitesse de chaque moteur, il doit prendre en compte un certain nombre d'informations en provenance des capteurs : de vitesse de déplacement du véhicule et des mesures de l'angle de braquage du volant.

A partir de ces deux informations, ce bloc calcule les vitesses de référence à imposer aux moteurs.



**Figure V-8** : Schéma générale de la commande de roues motrices.

### V.2.5.(c) Calcul de références de vitesse

Les deux roues motrices peuvent être commandées en vitesse, il est possible de déterminer les références de vitesse en fonction des ordres de conducteur, la vitesse de déplacement de  $V_h$  et l'angle de braquage du volant  $\alpha$  (la trajectoire souhaitée par le conducteur).

Un capteur de mouvement (position) logé sur le volant permet de fournir à chaque instant l'angle de braquage du volant  $\alpha_v$  [54], [45], [53].

Les roues directrices peuvent en effet être orientées selon la manœuvre du volant.

La relation entre l'angle de braquage du volant  $\alpha_v$  et celle des roues  $\delta$  est donnée par :

$$\delta = \frac{\alpha_v}{k_d} = \frac{n \cdot 360}{k_d} \quad (5.49)$$

Avec

$k_d$  : le rapport de démultiplication (=24/1 pour une direction classique).

$n$  : le nombre de tours du volant effectués par le conducteur.

Les vitesses des roues motrices sont données par l'expression (5.50), il reste donc de déterminer la variation de vitesse  $\Delta\omega$  en fonction de l'angle de braquage des roues  $\delta$  et la vitesse du véhicule.

Les vitesses de références des deux moteurs s'écrivent :

$$\begin{cases} \omega_{m_R}^* = N_{red} \cdot \omega_{r_R} \\ \omega_{m_L}^* = N_{red} \cdot \omega_{r_L} \end{cases} \quad (5.50)$$

avec

$N_{red}$  : Le rapport de réduction de vitesse.

## V.3 Résultats de simulation

Afin de caractériser le comportement du système de roues motrices, des simulations utilisant le modèle de la **Figure V-8** ont été effectués et ont permis d'observer couples, vitesses de rotation pour les différents trajets considérés, nous avons effectués des simulations numériques sous les conditions suivantes :

- ❖ Mouvements du véhicule en ligne droite avec vitesse de 60 km/h.
- ❖ Rampe de 10% et vitesse de 60 km/h.
- ❖ Mouvements du véhicule en virage
- ❖ Mouvements du véhicule avec échelon de vitesse de 60 km/h à 80 km/h.

Figure V-9 et Figure V-10 représentent résultat de simulation du mouvements de véhicule avec onduleur parfait et avec onduleur MLI sous les conditions suivantes : mouvement en ligne droit ,application d'un couple de pente et échelon de vitesse.

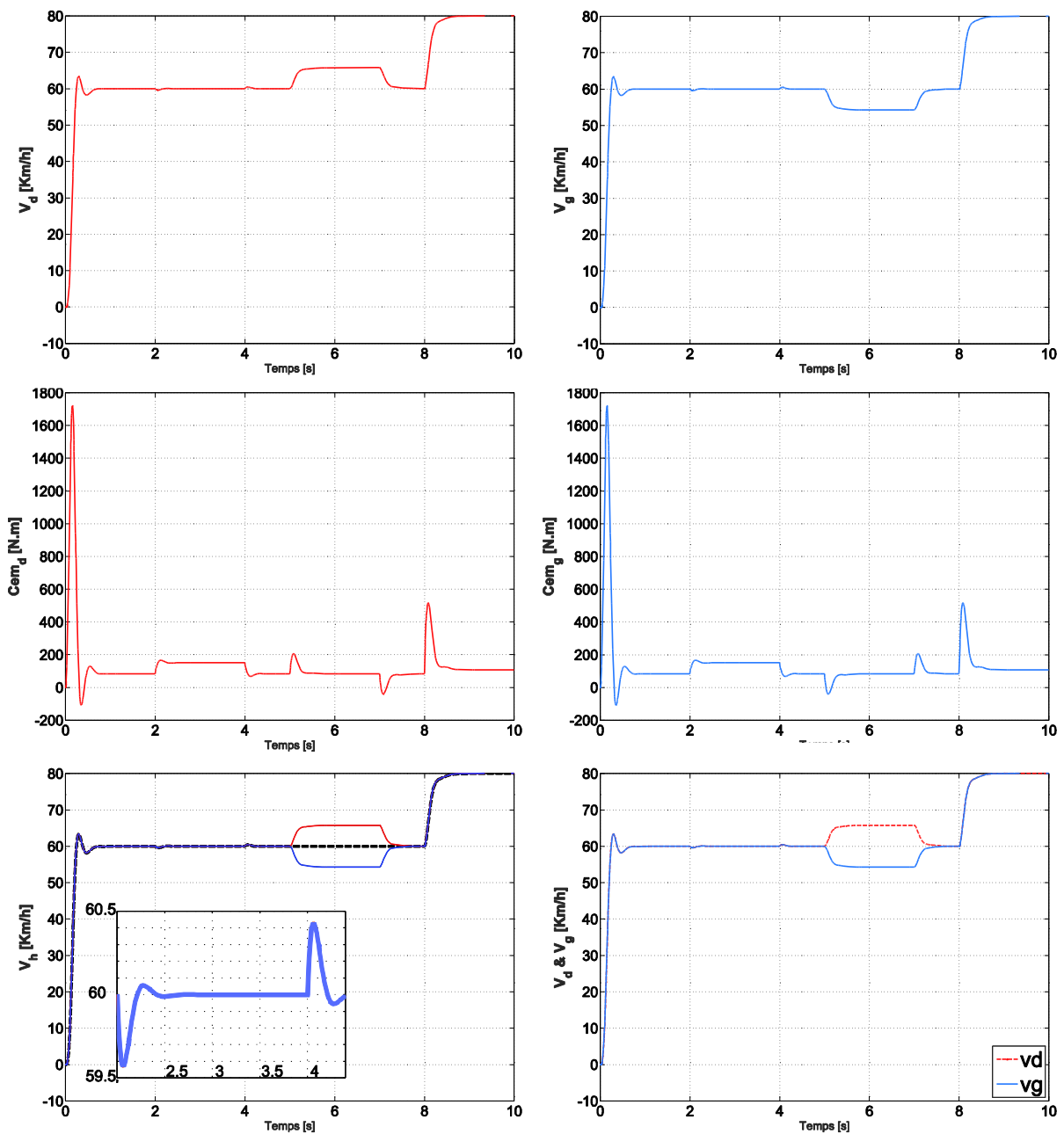
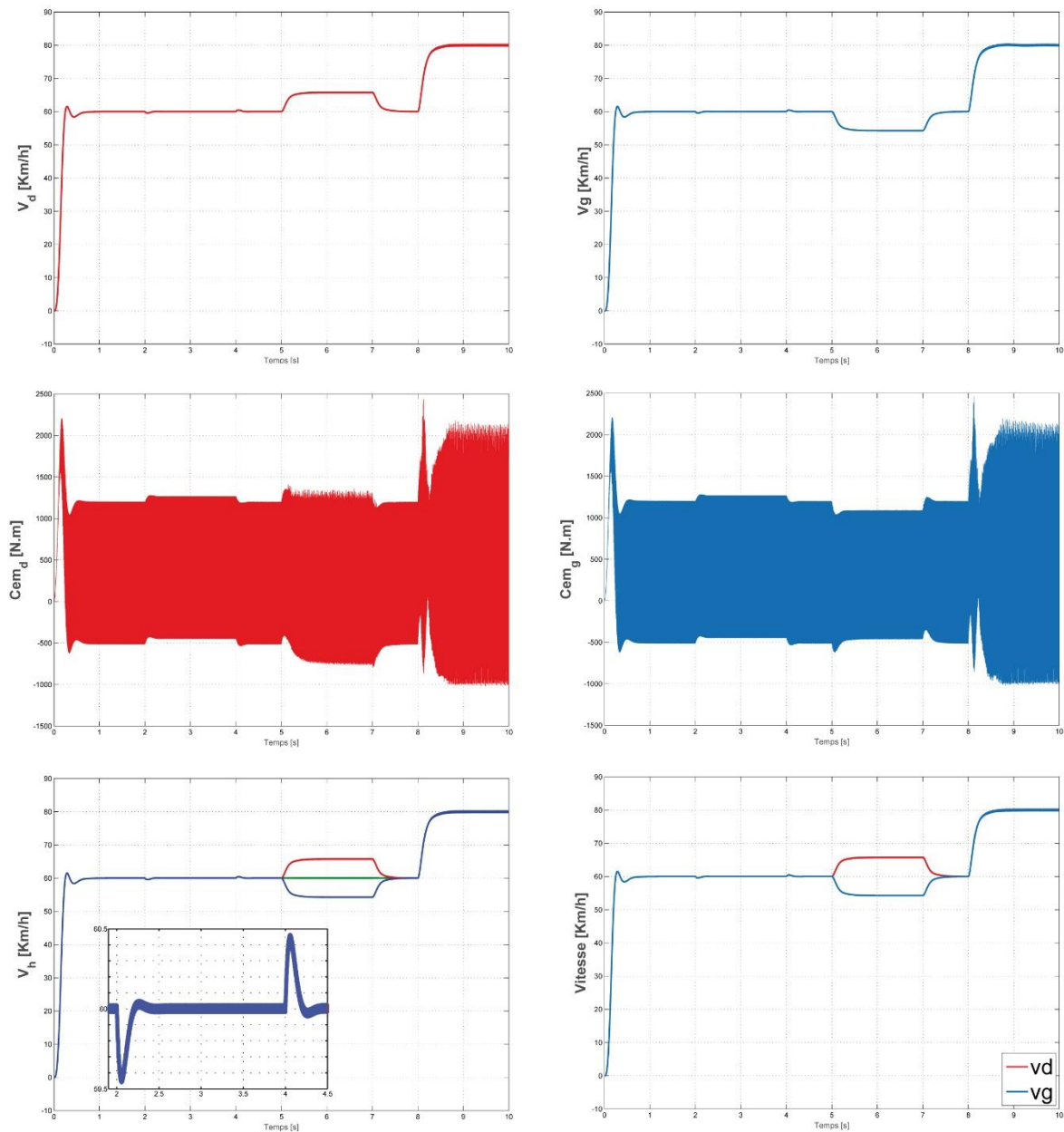


Figure V-9: Résultat de simulation mouvements du véhicule avec onduleur parfait (mouvement en ligne droit ,application d'un couple de pente et échelon de vitesse ).



**Figure V-10** : Résultat de simulation mouvements du véhicule avec onduleur MLI (mouvement en ligne droit ,application d'un couple de pente et échelon de vitesse ).

### V.3.1 Mouvements du véhicule en ligne droite avec vitesse de 60 km/h

Ce système est soumis à un échelon de vitesse de 60[km/h], dans un premier temps on suppose que les deux moteurs ne sont pas perturbés. On observe une bonne poursuite de l'échelon

Dans ce cas, les vitesses des roues motrices sont presque identiques, ces vitesses sont illustrées par les **Figure V-11** et **Figure V-12** , puisque les vitesses des roues motrices sont identiques, donc la différence de vitesse  $\Delta\omega$  est nulle en ligne droite.

Les couples développés par les moteurs pour maintenir le véhicule à une vitesse stabilisée de 60 [km/h] sont illustrés par la **Figure V-11** et par la **Figure V-12**.



En observe des ondulations dans les couples électromagnétiques des deux moteurs illustrés dans la Figure II-12

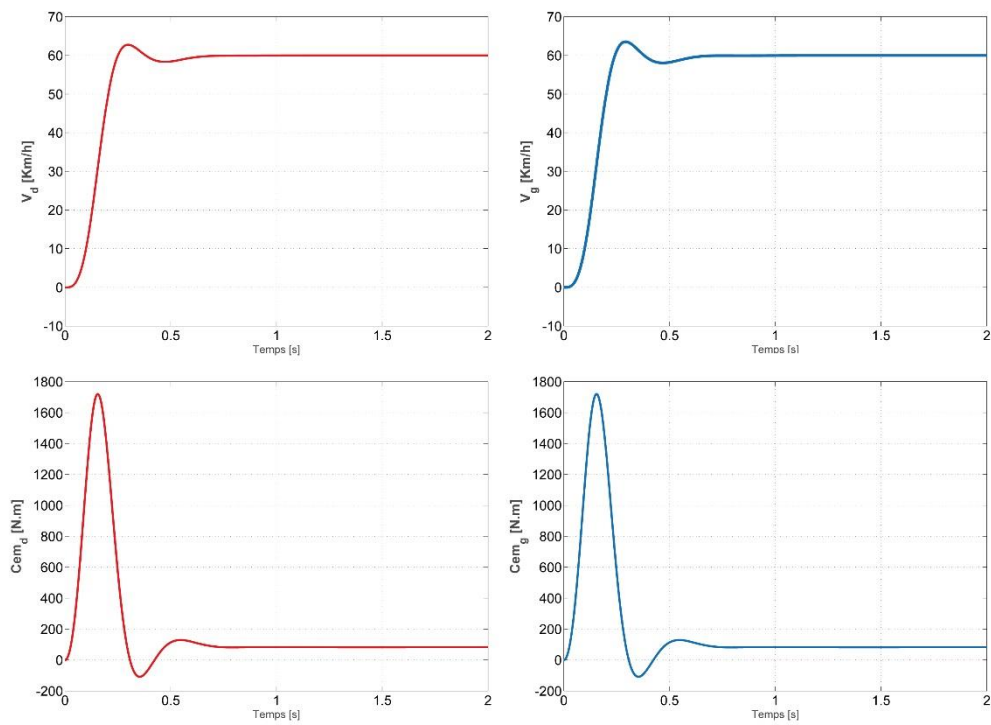


Figure V-11: Résultat de simulation en mouvement ligne droite avec onduleur parfait

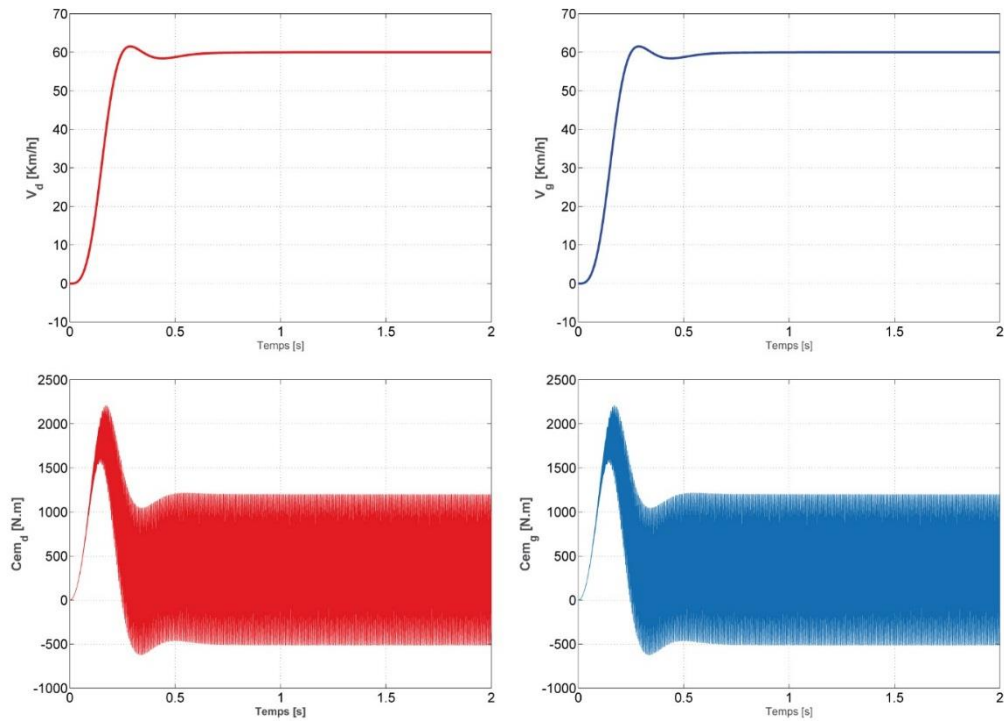


Figure V-12 : Résultat de simulation en mouvement ligne droite avec onduleur MLI



### V.3.2 Mouvements du véhicule en Rampe de 10% et vitesse de 60 km/h

Cette période montre l'influence de l'inclinaison de la roue sur le mouvement du véhicule.

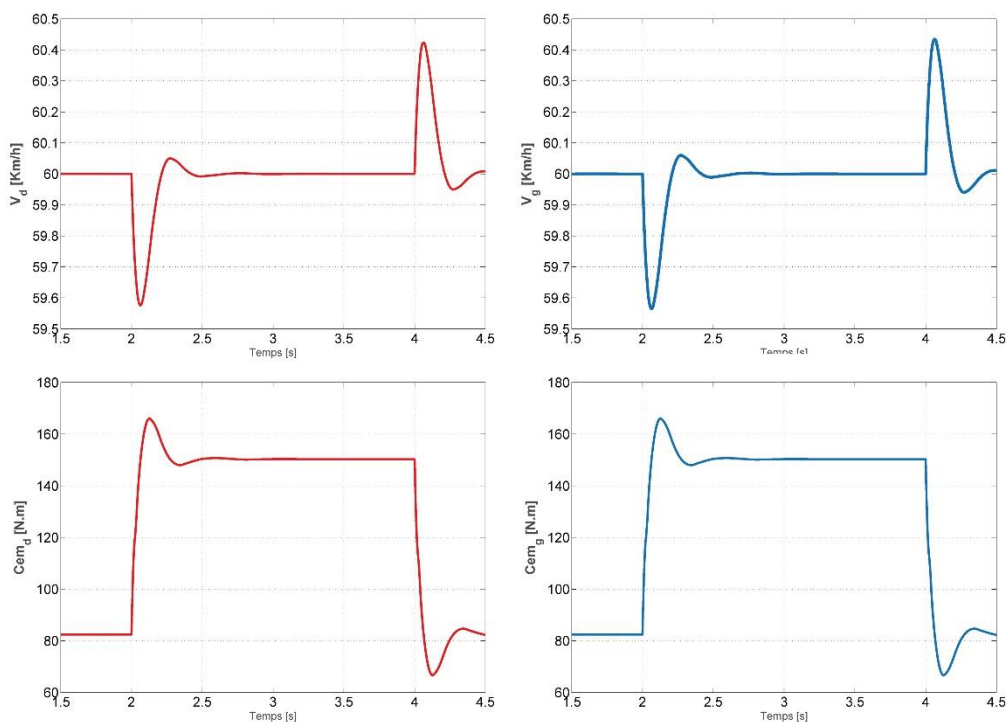
Dans ce cas, le véhicule monte une rampe de 10% (une rampe de 10% signifie que le véhicule s'élève de 10m lorsqu'il a parcouru 100m) à la vitesse de 60 km/h à  $t = 2$  s.

Le système est soumis à la même référence de vitesse. Seulement on suppose que les deux moteurs sont perturbés. Les vitesses des roues motrices sont toujours maîtrisées et presque identiques. L'influence de la rampe sur ces vitesses est illustrée par les **Figure V-13** et **Figure V-14**.

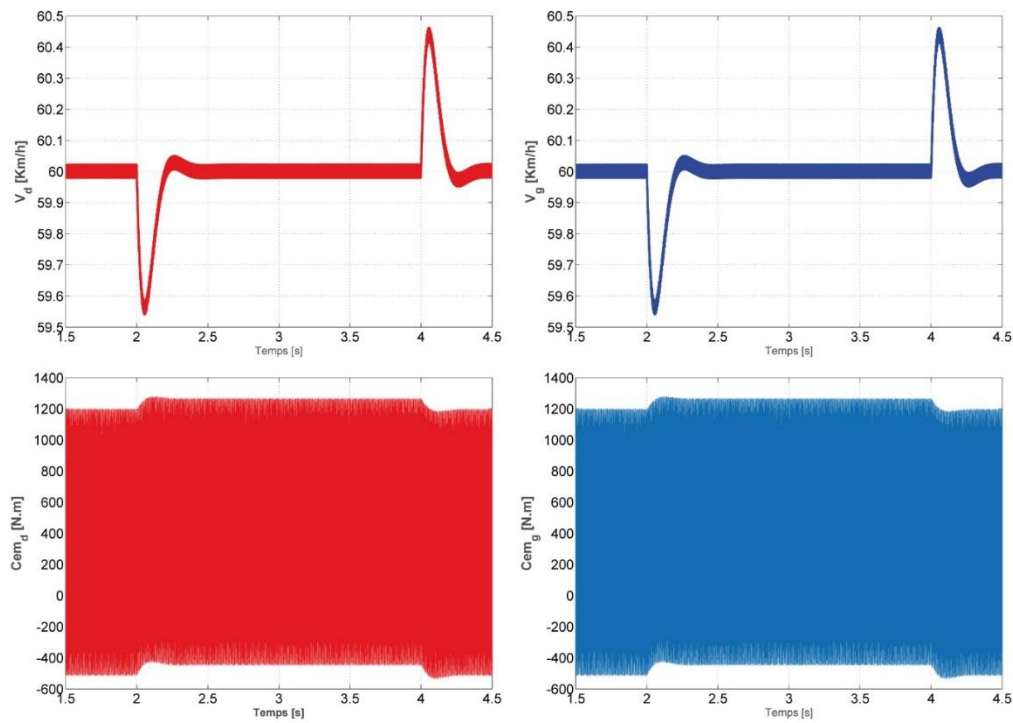
On observe que les erreurs de vitesse provoquées par la perturbation sont rapidement composées.

Les couples développés par les moteurs pour maintenir le véhicule à une vitesse stabilisée de 60 km/h en rampe de 10% sont illustrés par les **Figure V-13** et **Figure V-14**.

Sur les figures **Figure V-13** (2) et **Figure V-14** (2), on représente la variation du couple électromagnétique de chaque moteur lors de la montée du véhicule sur une rampe de 10%.



**Figure V-13:** Résultat de simulation mouvement en rampe 10% avec onduleur parfait



**Figure V-14:** Résultat de simulation mouvement en rampe 10% avec onduleur MLI

### V.3.3 Mouvement en virage à gauche à vitesse de 60 km/h

Le véhicule s'engage dans un virage à gauche avec une vitesse de 60 km/h entre l'instant  $t_1=5$ s et l'instant  $t_2=7$ s. on suppose que les deux moteurs ne sont pas perturbés. Dans ce cas, les roues motrices parcourent des chemins différents, elles tournent dans le même sens à des vitesses différentes. La roue motrice gauche tourne à une vitesse inférieure à celle droite. Ces vitesses et la différence de vitesse des roues motrices sont illustrées par la **Figure V-15** et **Figure V-16**

Le différentiel électronique agit sur les deux moteurs pour maintenir le véhicule à une vitesse de référence de 60 km/h en virage.

L'analyse d'un virage se fait sur deux points : l'entrée, où la vitesse aura le plus d'importance ; le point de corde qui est la trajectoire idéale afin de passer le virage le plus efficacement possible.

Sur la **Figure V-15** et **Figure V-16**, on représente la variation du couple de chaque moteur lors de l'engagement du véhicule en virage.

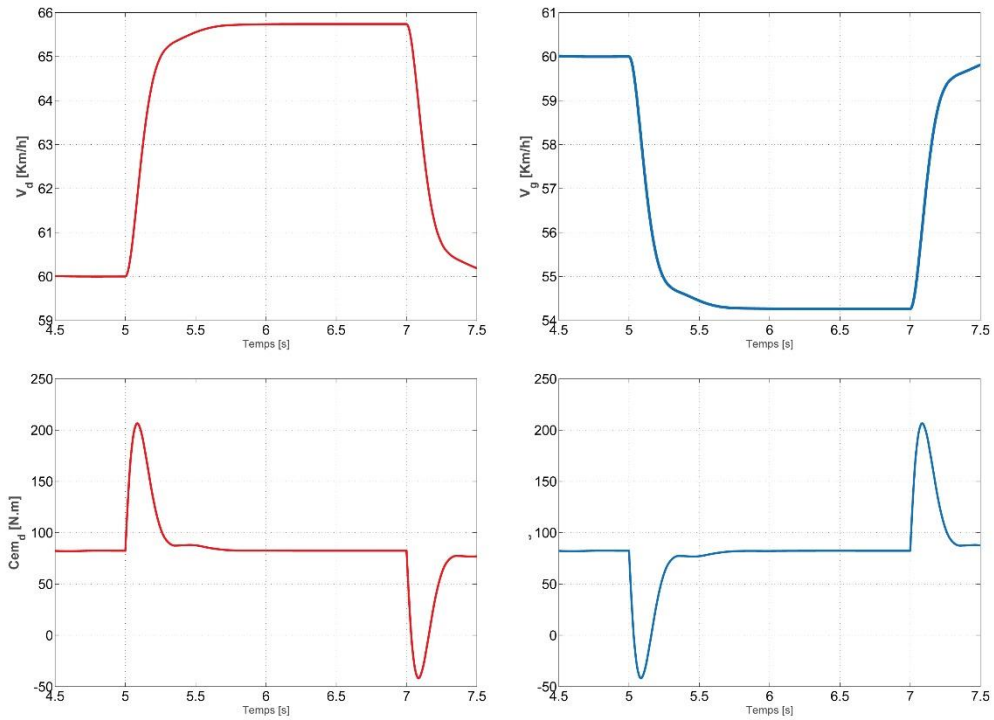


Figure V-15 : Résultat de simulation mouvement en virage à gauche avec onduleur parfait

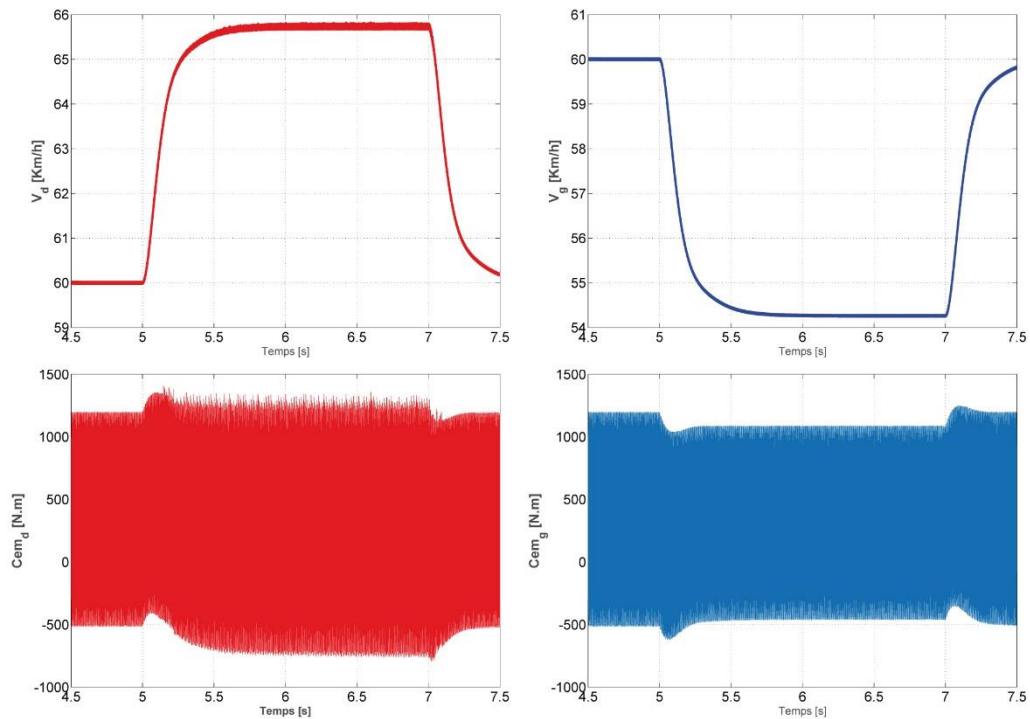


Figure V-16 : Résultat de simulation mouvement en virage à gauche avec onduleur MLI

### V.3.4 Terrain plat et échelon de vitesse.

Pour augmenter la vitesse, il faut accélérer le véhicule pour augmenter les couples fournis par les moteurs en appuyant d'avantage sur l'accélérateur.

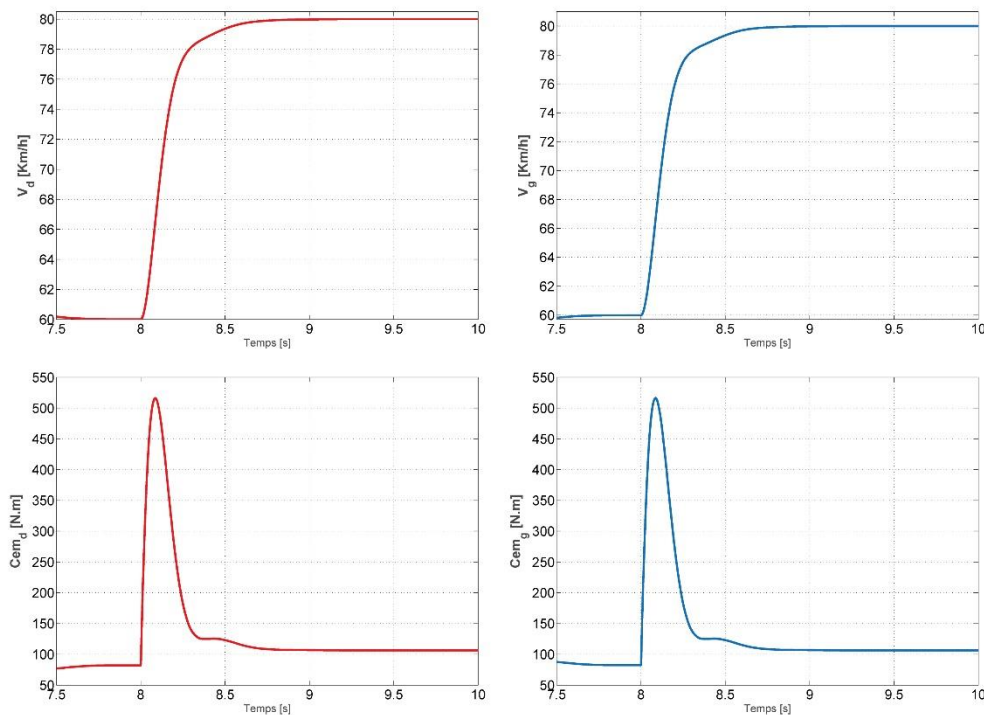
Dans cet essai, le système est soumis à un échelon de vitesse on fait rouler le véhicule à une vitesse de 60 km/h sur un terrain plat, en bon état (le vent doit être autant que possible nul), puis à une vitesse de 80 km/h à  $t=8$  s. On observe une bonne poursuite de l'échelon de vitesse.

Les deux roues motrices tournent dans le même sens à des vitesses presque identiques. Ces vitesses sont illustrées par la **Figure V-17** et **Figure V-18**, les roues tournent dans un premier temps à 60 km/h, puis à 80 km/h après le changement de vitesse.

Puisque les deux roues motrices parcourent des chemins identiques, donc la différence de vitesse est toujours maintenue nulle.

Le changement de vitesse de 60 km/h à 80 km/h se traduit par une augmentation du couple de chaque moteur à  $t = 8$ s.

Les couples résistants à l'avancement du véhicule correspondant à cet essai sont illustrés par la **Figure V-4**. On peut constater que le couple aérodynamique n'est que l'image de la vitesse de déplacement du véhicule à  $t=8$ s.



**Figure V-17:** Résultat de simulation mouvement en échelon de vitesse avec onduleur parfait

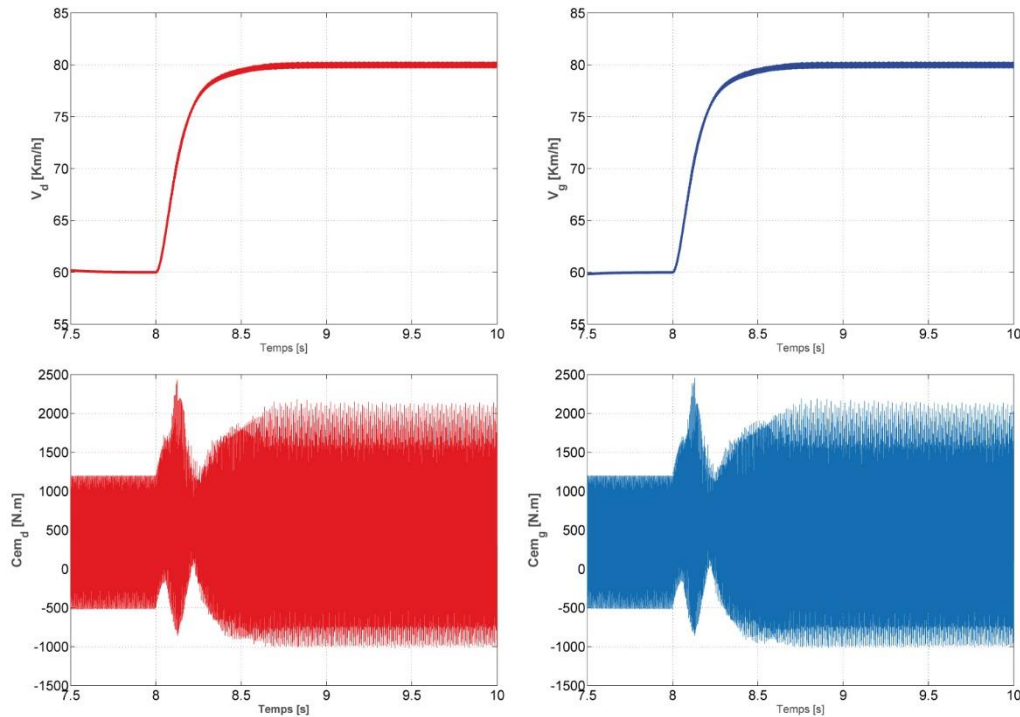


Figure V-18 : Résultat de simulation mouvement en échelon de vitesse avec onduleur parfait

## V.4 Conclusion

Ce chapitre est dédié au système de propulsion à deux roues motrices. Ce dernier est un système multi-machine multi-convertisseur, on le définit comme étant un système formé par plusieurs actionneurs électriques couplés entre eux mécaniquement.

Afin de réaliser le différentiel électronique, la structure de commande "machines indépendantes" est appliquée au système de propulsion à deux roues motrices, par une commande en vitesse. On voit que cette structure résout le problème de couplage mécanique. On peut remarquer qu'un différentiel idéal viserait plutôt à répartir les forces de traction.

Le système différentiel électronique assure le contrôle du comportement roulier du véhicule. En effet, il permet à chaque roue motrice de tourner à des vitesses différentes dans les virages.

Les résultats de simulation obtenus montrent que les vitesses de roue motrice restent toujours contrôlées avec de bonnes performances dynamiques et statiques.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine des entraînements électriques à vitesse variable, application véhicule électrique. L'objectif de ce mémoire est d'étudier la simulation numérique sous l'environnement MATLAB « SIMULINK » (version 8.5) d'un véhicule électrique bimoteur asynchrone alimenté par une pile à combustible type PEMFC. Pour atteindre cet objectif, nous nous sommes appuyés sur la modélisation d'une motorisation asynchrone qui, après une étude bibliographique, nous a paru comme étant un bon compromis entre la performance et le coût.

Dans le premier de ce mémoire, nous avons présenté de manière synthétique le véhicule électrique. Nous avons abordé le problème de la motorisation de la chaîne de traction et esquissé une description de certaines technologies émergentes tentant d'apporter des réponses à ce problème.

Par la suite, nous avons présenté la modélisation des éléments constitutifs de la chaîne de traction électrique. Le choix du moteur de traction s'est porté sur un moteur asynchrone vu son faible coût, nous avons présenté un modèle de l'onduleur commandé par MLI.

Le troisième chapitre est conçu à l'étude vectorielle de la machine asynchrone ainsi que le principe d'orientation de flux rotorique indirect (IFOC) de la MAS. Elle nous a permis de montrer que le bon choix du modèle permet d'avoir un modèle aisément contrôlable ainsi une structure de commande assez puissante.

Le quatrième chapitre, a été réservé à l'aspect performances énergétiques dans lequel la production de l'énergie électrique à partir d'une pile à combustible type PEMFC afin d'assurer l'autonomie de véhicule.

Nous nous sommes ensuite intéressés à présenter dans le cinquième chapitre la structure de commande proposées pour la propulsion d'un véhicule électrique bimoteur asynchrone. La simulation de cette structure, nous a permis de mettre en évidence le principe du différentiel électrique. Les résultats de simulation ont montré clairement la nécessité d'introduire le **SMC** afin d'assurer l'agrément de conduite du conducteur, la réponse en vitesse et couple été améliorés, ce qui se traduit bien par une annulation de dépassement un très bon, rejet de perturbation et temps de montée améliorés.

## Annexe

### *Paramètres de la machine asynchrone*

Les paramètres de la machine asynchrone que nous avons utilisés dans toutes les simulations sont :

Puissance nominale	100 Ch
Vitesse nominale	2885 tr/min
Fréquence nominale	50Hz
Courant nominal	631 A
Résistance statorique	0.0044 $\Omega$
Résistance rotorique	0.003 $\Omega$
Inductance cyclique statorique	498.2 $\mu$ H
Inductance cyclique rotorique	494.9 $\mu$ H
Inductance mutuelle	482 $\mu$ H
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	1.5 kg/m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	0.00114 N.m.s/rad



## *Paramètres véhicule électrique*

Les paramètres du véhicule que nous avons utilisés dans toutes les simulations sont :

Couple de traction de moteur	247 Nm
Moment d'inertie de la Transmission	7.07 Kg.m <sup>2</sup>
Rayon de roue	0.26 m
Rapport de démultiplication total	10.0
Efficacité de transmission totale	0.93
Masse de véhicule	3904 Kg
Coefficient de frottement du roulement	0.001
Coefficient aérodynamique	0.46
Zone frontale de véhicule	3.48 m <sup>2</sup>
Coefficient de friction de véhicule	0.01
Angle de pente de la route	rad
Distance entre les roues motrices	1.5 m
Empâtement du véhicule	2.5 m

## Bibliographié

- [1] N. Guessouri, “Étude comparative entre influence des différent paramétrer physique et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation,” 2019.
- [2] D.Benoudjit, “Contribution a l’optimisation et a la commande D’un système de propulsion Pour véhicule électrique,” Thèse Doctorat Es-Science Université de Batna, Janvier 2010.
- [3] CHENNOUFI H, “Contribution à l’ Etude de la Commande d’un Véhicule Electrique à Deux Roues Motrices,” ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE, 2005.
- [4] Michel. Kant, « *La voiture électrique* » *Technique de l’ingénieur*. .
- [5] S. Lacroix, “Modélisation et commande d’une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries.” THÈSE DE DOCTORAT,Paris 11, 2013.
- [6] V. Mester, “Conception optimale Systémique des Composants des Chaînes de traction Electrique,” Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [7] J. Syrota, É. Beeker, A. Bryden, J. Buba, C. Le Moign, and F. Von Pechmann, “La voiture de demain: carburants et électricité,” *Cons. d’Analyse Strat. Paris*, 2011.
- [8] M. PORNIN, “Traction électrique automobile routière,” 1981.
- [9] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. Ebrahimi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.
- [10] J. Scordia, “Approche systématique de l ’ optimisation du dimensionnement et de l ’ élaboration de lois de gestion d ’ énergie de véhicules hybrides.” 2004.
- [11] W. Lhomme, “Gestion d’énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique.” Lille 1, 2007.
- [12] F. Badin, O. Briat, S. Olivier, B. Jeanneret, R. Trigui, and B. Malaquin, “The use of batteries in hybrid vehicles,” 2004.
- [13] A. Bruyere, “Modélisation et commande d’un alterno-démarrreur heptaphasé pour application automobile micro-hybride.” 2009.
- [14] F. Badin, B. Jeanneret, R. Trigui, and F. Harel, “Hybrid vehicles should we plug them to the grid or not?,” in *The 18th International Electric Vehicle Symposium*, 2001, pp. 21–24.
- [15] T. Takaoka, M. Komatsu, and B. Biebuyck, “Newly developed Toyota plug-in hybrid system and its vehicle performance under real life operation,” SAE Technical Paper, 2011.
- [16] C. C. Chan, “The state of the art of electric and hybrid vehicles,” *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002.
- [17] G. Grellet and G. Clerc, *Actionneurs électriques*. 1997.
- [18] B. Multon and L. Hirsinger, “Problème de la motorisation d’un véhicule électrique,” 1994.
- [19] D. C. Katsis, “Development of a Testbed for Evaluation of Electric Vehicle Drive Performance.” Virginia Tech, 1997.

- 
- [20] P. Kachroo, "Nonlinear control strategies and vehicle traction control.," 1995.
- [21] B. Multon, "Motorisation des véhicules électriques," *Tech. l'ingénieur. Electron.*, vol. 3, no. E3996, pp. 1–28, 2001.
- [22] Z.-Q. Zhu and D. Howe, "Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746–765, 2007.
- [23] R. I. Hodkinson, "Brushless DC motors for electric and hybrid vehicles," 1996.
- [24] A. BABA, "Optimisation du Flux dans la Machine à Induction par une Commande Vectorielle : Minimisation des Pertes," Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Pierre & Marie Curie, Paris VI, 1997.
- [25] R. Trigui, "Motorisation asynchrone pour véhicules électriques: modélisation, optimisation et évaluation." Institut National Polytechnique de Lorraine, 1997.
- [26] P. Bastiani, "Stratégies de commande minimisant les pertes d'un ensemble convertisseur-machine alternative: application à la traction électrique." Lyon, INSA, 2001.
- [27] C. C. Chan, "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, 2007.
- [28] Z. Qianfan, C. Shumei, and T. Xinjia, "Hybrid switched reluctance motor applied in electric vehicles," in *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 359–363.
- [29] F. Benmohamed, "Commande des véhicules électriques par mode glissant," Mémoire de Master, Université de Béchar, 2011.
- [30] S. Sakai, H. Sado, and Y. Hori, "Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors," *IEEE/ASME Trans. mechatronics*, vol. 4, no. 1, pp. 9–16, 1999.
- [31] N. Mutoh, R. Masaki, T. Miyazaki, F. Tajima, and T. Ohmae, "Electric vehicle drive system and drive method." Google Patents, Aug. 27, 1996.
- [32] S. Sakai, T. Okano, T. C. Hwa, T. Uchida, and Y. Hori, "Experimental studies on vehicle motion stabilization with 4 wheel motored ev," *Proc. EVS 18 Berlin*, 2001.
- [33] D. Foito, A. Roque, J. Esteves, and J. Maia, "Electric Vehicle with two independent wheel drives-improving the performance with a traction control system," in *Proceedings on the "17th International Electric Vehicle Symposium & Exposition-EVS*, 2000, vol. 17.
- [34] A Nasri, "Contrôleurs de type : flou, mode glissant et backstepping pour la commande d'un véhicule électrique," Thèse doctorat, Université de Bechar, 2011.
- [35] A. Nasri, A. Hazzab, I. K. Bousserhane, S. Hadjeri, and P. Sicard, "Backstepping propulsion system control for electric vehicle drive," *J. Cybern. Informatics*, vol. 8, pp. 1–16, 2009.
- [36] A. Hazzab, "Application de l'intelligence artificielle dans les systèmes électriques," Thèse Doctorat Es-Sciences, UST Oran, 2006.
- [37] A. Benslimane and M. Bouziani, "Commande d'une machine à induction linéaire LIM avec effets aux limites par mode glissant," Mémoire d'ingénieur, Université de Bechar, 2009.
- [38] J. P. H. J.P. Caron, "Modélisation et commande de la machine asynchrone," Edition Technip,
-

---

1995.

- [39] A. RACHID, “Régulation électromécanique,” *Tech. l’ingénieur*, vol. 7, p. 540, 1997.
- [40] A. B. O. Boughazi, “Commande par mode glissant d’un LIM,” Mémoire d’ingénieur, CUB, 2006.
- [41] L. Baghli, “Modélisation et commande de la machine asynchrone,” Note de cours, université de Henry Poincaré, 2003/2004.
- [42] J. Chatelain, “Machines Electriques, Traité d’Electricité, Volume X,” *Press. Polytech. Rom. Lausanne*, 1983.
- [43] G. Buche, “Commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel Matlab/Simulink.” 2001.
- [44] A. Nasri, “The efficiency of the inference system knowledge strategy for induction motor linear speed control of an urban electric vehicle,” *J. Autom. Mob. Robot. Intell. Syst.*, vol. 4, pp. 85–93, 2010.
- [45] N. wheel speed robust sliding mode control for electric vehicle drive Abdelfatah, H. Abdeldjebar, I. K. Bousserhane, S. Hadjeri, and P. Sicard, “Two wheel speed robust sliding mode control for electric vehicle drive,” *Serbian J. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 199–216, 2008.
- [46] N. SOUALHI, “Optimisation du Rendement d’un Ensemble Convertisseur-Machine à Induction,” Thèse de Magister, Université de Batna, octobre 2004.
- [47] K. Chen, A. Bouscayrol, and W. Lhomme, “Energetic macroscopic representation and inversion-based control,” *J. Asian Electr. Veh.*, vol. 6, no. 1, pp. 1097–1102, 2008.
- [48] I.K BOUSERHANE, “Contribution à la commande moderne et hybride d’un moteur à induction et linéaire,” Thèse Doctorat Es-Sciences, UST Oran, 2008.
- [49] I.-S. Kim, “Non linear state of charge estimator for hybrid electric vehicle battery,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 4, pp. 2027–2034, 2008.
- [50] A. Nasri, A. Hazzab, I. K. Bousserhane, S. Hadjeri, and P. Sicard, “Fuzzy logic speed control stability improvement of lightweight electric vehicle drive,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 129–139, 2010.
- [51] Y.-P. Yang and C.-P. Lo, “Current distribution control of dual directly driven wheel motors for electric vehicles,” *Control Eng. Pract.*, vol. 16, no. 11, pp. 1285–1292, 2008.
- [52] A. Haddoun, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili, and K. Srairi, “Modeling, analysis, and neural network control of an EV electrical differential,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2286–2294, 2008.
- [53] K. Hartani, “Contribution à la stabilité du véhicule électrique à l’aide du contrôle des systèmes anti-patinage.” thèse de Doctorat, USTO, Oran, Algérie, 2007.
- [54] K. Hartani, “Commande des roues motrices d’un véhicule électrique,” Thèse Magister, USTO, Octobre 2003.
- [55] B. K. Bose, “Modern Power electronics and AC drives,” Printice-Hall, 2001.

- 
- [56] A. Miloud, "Commande robuste de la machine asynchrone," Thèse Doctorat Es-Sciences, UST Oran, 2006.
- [57] Y. Mihoub, "Commande Neuro-floue d'une machine asynchrone." Thèse de Magister, USTO, 2002.
- [58] J. Ghouli, "Commande sans capteur d'une machine asynchrone avec estimation de la vitesse par réseaux de neurones," Thèse Phd, Canada, 2002.
- [59] A. Boukhelifa, "sensibilité de la commande par flux orienté indirecte aux variations des paramètres rotoriques," in *International Conférence on Electrotechnic ICEL*, 2000.
- [60] A. Boucheta, "Synthèse sur la commande par Backstepping de la machine asynchrone, mémoire de Magister." CUB, 2006.
- [61] A. Hazzab, I. K. Bousserhane, and M. Kamli, "Design of a fuzzy sliding mode controller by genetic algorithms for induction machine speed control," *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 1, no. 2, 2004.
- [62] M. Péra, D. Hissel, H. Gualous, and C. Turpin, *Composants électrochimiques*. 2014.
- [63] A. Harkati and D. Berreghioua, "Utilisation des réseaux de neurones, logique floue et adaptative Neuro-flou pour la commande d'un système énergétique à PAC destinée à une application résidentielle.," Mémoire d'ingénieur, Université de Bechar, 2009.
- [64] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 86, no. 1–2, pp. 173–180, 2000.
- [65] J. J. Baschuk and X. Li, "Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding," *J. Power Sources*, vol. 86, no. 1–2, pp. 181–196, 2000.
- [66] A. L. Dicks and D. A. J. Rand, *Fuel cell systems explained*. John Wiley & Sons, 2018.
- [67] J. M. Corrêa, F. A. Farret, L. N. Canha, and M. G. Simoes, "An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 1103–1112, 2004.
- [68] J. C. Amphlett, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and A. Rodrigues, "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 61, no. 1–2, pp. 183–188, 1996.
- [69] D. Chu and R. Jiang, "Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks: Part I. Evaluation and simulation of an air-breathing PEMFC stack," *J. Power Sources*, vol. 83, no. 1–2, pp. 128–133, 1999.
- [70] A. Nouh, "Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers," Thèse Doctorat, l'Université de Franche Comté France, 26 Mars 2008.
- [71] A. Nasri, A. Hazzab, I. K. Bousserhane, S. Hadjeri, and P. Sicard, "Fuzzy-sliding mode speed control for two wheels electric vehicle drive," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 499–509, 2009.
- [72] J. Larminie and J. Lowry, *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, 2012.
-

