

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

## وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Électrotechnique

N° :...../2023

### **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Électrotechnique**

**SPECIALITE: Commande électrique**

### **Thème**

**Étude et commande du système de puissance d'un véhicule  
électrique**

**Présenté Par : Mohamed El Amine BABA**

**Encadré Par : Abdelaziz MAOUCHE**

**Date de soutenance: 03/07/2023**

#### **Jury de Soutenance**

**Président : Nabil LOURCI**

**Grade : MCB**

**Univ MSB jijel**

**Encadreur : Abdelaziz MAOUCHE**

**Grade : MCB**

**Univ MSB jijel**

**Examineur 1: Boubekeur MEDJAHED**

**Grade : MAA**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2022 /2023**

## **REMERCIEMENT**

Je tiens d'abord à Remercier dieu tout puissant, qui m'a éclairé le bon chemin et que m'a permis de Réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes chaleureuses gratitudes à Mr. Abdelaziz MAOUCHE pour son aide, son encouragement, sa patience et ses précieux conseils.

Je Remercie également tous les membres de Jury, qui sont déjà mes enseignants pendant trois ans pour avoir bien voulu évaluer Mon travail.

L'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique pour leurs efforts pendant les années d'études.

En fin J'adresse mes Remerciements les plus profonds et les distinguées à tous ceux qui nous aidons de proche ou de loin pour accomplir ce travail.

## DÉDICACE

Je dédie ce travail de recherche marquant une période importante de ma vie.

A la mémoire de ma grand-mère Taous.

Ma plus grande et plus profonde gratitude va à ma source de bonheur, d'amour et d'affection : mes parents Djamel et Noura, ce travail est pour vous, Merci pour vos encouragements, votre patience et surtout votre confiance. Que dieu vous garde pour nous.

A mon cher frère Imad et mes chères sœurs pour leurs soutiens et ses encouragements.

A Tous les membres de ma grande famille BABA.

A Mes meilleurs amis Ilyas, Khaled, Rafik, Wail et Wail.

A tous mes collègues de ma promotion 2022/2023 surtout Seyfeddine, Mustapha, Marouane et Lotfi.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

## Résumé

Un véhicule électrique (VE) est une automobile dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Les travaux de ce mémoire s'articulent ainsi autour des points suivants :

- Une première étape consiste à modéliser le véhicule électrique. Un modèle dynamique longitudinal du véhicule, une modélisation du moteur synchrone à rotor bobiné et un modèle dynamique des convertisseurs statique et de la batterie.
- Dans une seconde étape, nous procédons à la commande vectorielle du moteur et la commande par MLI d'onduleur. À la fin on termine par l'association des éléments présenté.

Les résultats obtenus par l'association confirment que ces commandes offrent une meilleure robustesse en présence des variations paramétriques et de perturbations.

**Mots clés :** Véhicule Électrique (VE), Modélisation, Machine Synchrone à Rotor Bobiné (MSRB), PI, Chaine de traction, Commande vectorielle, Système de puissance.

## ABSTARCT

An electric vehicle (EV) is an automobile whose propulsion is provided by a motor operating exclusively on electric energy. The work of this brief is organized around the following points:

- A first step is to model the electric vehicle. A longitudinal dynamic model of the vehicle, a model of the wound rotor synchronous motor and a dynamic model of the static converters and the battery.
- In a second step, we proceed to vector motor control and PWM inverter control. At the end we end with the association of the elements presented.

The results obtained by the association confirm that these controls offer a better robustness in the presence of parametric variations and disturbances.

**Keywords:** Electric Vehicle (EV), Modeling, Wound Rotor Synchronous Machine (WRSM), PI, Electric drivetrain, Vector Control, Power System.

## ملخص

المركبة كهربائية (EV) هي سيارة تعتمد تحركها بالكامل على الطاقة كهربائية. يتم تنظيم عمل هذا الملخص حول النقاط التالية:

- الخطوة الأولى هي وضع نمذجة المركبة الكهربائية. يشمل ذلك نموذجًا ديناميكيًا طويلًا للمركبة، ونموذجًا للمحرك المتزامن ذو الدوار الملفوف، ونموذجًا ديناميكيًا للمحولات الثابتة والبطارية.
- في الخطوة الثانية، نقوم بالتحكم القطبي للمحرك والتحكم بمحول التردد بالتربينات ذات التردد المنقسم. في النهاية، ننتهي بربط العناصر المقدمة.

**الكلمات الرئيسية:** مركبة كهربائية (EV)، النمذجة، ماكينة مترامنة ذات الدوار الملفوف (WRSM)، تحكم PI، النظام الدفعي الكهربائي، التحكم القطبي، نظام القدرة.

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Fig(I.1)</b>	Le véhicule électrique crée par Thomas Parker en 1835	04
<b>Fig(I.2)</b>	La jamais contente conçue par Camille Jenatzy	04
<b>Fig(I.3)</b>	Victor Wouk avec la Buick Skylark en 1972	05
<b>Fig(I.4)</b>	Exemple d'un VE d'aujourd'hui Renault Zoé	05
<b>Fig(I.5)</b>	Exemple d'une VE batteries rechargeables par prise de courant	08
<b>Fig(I.6)</b>	Structure d'une VE à alimentation par pile à combustible	09
<b>Fig(I.7)</b>	Exemple schématique d'architecture série	10
<b>Fig(I.8)</b>	Exemple schématique d'architecture parallèle	10
<b>Fig(I.9)</b>	Exemple schématique d'architecture combiné	11
<b>Fig(I.10)</b>	Exemples schématiques de motorisations monomoteurs	11
<b>Fig(I.11)</b>	Exemples schématiques de motorisations multi-moteurs	12
<b>Fig(I.12)</b>	Carrosserie standard d'un véhicule	13
<b>Fig(I.13)</b>	Exemple de batterie Lithium-Ion d'un Véhicule électrique	13
<b>Fig(I.14)</b>	Bloc moteur d'un véhicule électrique	14
<b>Fig(I.15)</b>	Boite à convertisseur de puissance d'un véhicule électrique	14
<b>Fig(I.16)</b>	Bloc de transmission	15
<b>Fig(I.17)</b>	Schéma Structure de base d'un véhicule électrique	15

## Chapitre II

<b>Fig(II.1)</b>	Modèle de base d'un véhicule électrique	18
<b>Fig(II.2)</b>	Les forces appliquées sur le véhicule	19
<b>Fig(II.3)</b>	simplifié pour la détermination de la pente	21
<b>Fig(II.4)</b>	Conditions de roulage (Exemple)	23
<b>Fig(II.5)</b>	Forces appliqués au véhicule	24
<b>Fig(II.6)</b>	Représentation simplifié du modèle véhicule	25
<b>Fig(II.7)</b>	Couple, vitesse et puissance de transmission	26
<b>Fig(II.8)</b>	Les différents types d'engrenages	26
<b>Fig(II.9)</b>	Les différents types des roulements	27
<b>Fig(II.10)</b>	Bloc mécanique réel d'un différentiel	27
<b>Fig(II.11)</b>	Bloc réel du cardan d'un véhicule	28
<b>Fig(II.12)</b>	Bloc réel de transmission d'un véhicule électrique	28
<b>Fig(II.13)</b>	Schéma cinématique d'un système de transmission	29
<b>Fig(II.14)</b>	Schéma bloc du modèle de transmission	30
<b>Fig(II.15)</b>	Couple, vitesse et puissance coté moteur	31
<b>Fig(II.16)</b>	différents types des machines synchrone	32
<b>Fig(II.17)</b>	Bloc réel un rotor bobiné d'une machine synchrone	33
<b>Fig(II.18)</b>	Moteur synchrone à rotor bobiné	33
<b>Fig(II.19)</b>	Représentation schématique du repère triphasé d'une MSRB	34
<b>Fig(II.20)</b>	Représentation symbolique de la machine synchrone dans le repère DQ	36
<b>Fig(II.21)</b>	Couple électromagnétique du moteur	40
<b>Fig(II.22)</b>	Vitesse du moteur en Rad/S	40
<b>Fig(II.23)</b>	Courant Id et Iq du moteur MSRB	41
<b>Fig(II.24)</b>	Schéma de puissance d'un véhicule électrique	41

<b>Fig(II.25)</b>	(A) Hacheur Buck, (B) Hacheur Boost, (C) Hacheur Buck-Boost	43
<b>Fig(II.26)</b>	(a) Hacheur Buck en état « On », (b) Hacheur Buck en état « Off »	43
<b>Fig(II.27)</b>	Simulation Hacheur Buck en boucle ouverte	45
<b>Fig(II.28)</b>	Hacheur Buck-Boost pendant l'état « On » à gauche, et pendant l'état « Off » à Droite	46
<b>Fig(II.29)</b>	Simulation Hacheur Buck boost en boucle ouverte	48
<b>Fig(II.30)</b>	(A) Onduleur en demi-pont, (B) Onduleur en pont complet	48
<b>Fig(II.31)</b>	Schéma d'un onduleur triphasé	49
<b>Fig(II.32)</b>	Tension composée entre phase et phase	50
<b>Fig(II.33)</b>	Tension simple entre phase et neutre	50
<b>Fig(II.34)</b>	Schéma bloc du filtre LC	51
<b>Fig(II.35)</b>	signal sinusoïdale perturbé	52
<b>Fig(II.36)</b>	Signal sinusoïdale filtré	52
<b>Fig(II.37)</b>	Schéma réaction chimique du Batterie Plomb acide	53
<b>Fig(II.38)</b>	Schéma réaction chimique du Batterie Nickel-Cadmium	54
<b>Fig(II.39)</b>	Schéma réaction chimique du Batterie Nickel-Hydrure-Métallique	54
<b>Fig(II.40)</b>	Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion	55
<b>Fig(II.41)</b>	Modèle de batterie ( $E_0$ , R, C)	57
<b>Fig(II.42)</b>	La tension à vide aux bornes d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC.	58
<b>Fig(II.43)</b>	La résistance interne d'une cellule en fonction du SOC et la T (°C).	59
<b>Fig(II.44)</b>	L'état de charge (SOC) en fonction du temps	59
<b>Fig(II.45)</b>	la tension fournie par une cellule en fonction de temps	59
<b>Fig(II.46)</b>	la tension fournie par une cellule en fonction de SOC	60
<b>Fig(II.47)</b>	la tension d'une cellule au pack batterie	60
<b>Fig(II.48)</b>	Tension et courant en situation de décharge d'une batterie Lithium-ion	61

## Chapitre III

<b>Fig(III.1)</b>	Schéma du système de puissance étudié	64
<b>Fig(III.2)</b>	Schéma du PID en boucle fermé	65
<b>Fig(III.3)</b>	La tension de la sortie dans le cas d'hacheur Buck 80V au 14V	68
<b>Fig(III.4)</b>	La tension de la sortie dans le cas d'hacheur Buck 400V au 100V	68
<b>Fig(III.5)</b>	La tension de sortie dans le cas d'un hacheur Buck-Boost	70
<b>Fig(III.6)</b>	approximation du vecteur de référence par les tensions d'alimentation	72
<b>Fig(III.7)</b>	principe du MLI triangulo-sinusoïdale	73
<b>Fig(III.8)</b>	les impulsions de commande	74
<b>Fig(III.9)</b>	la tension de phase $V_A$ en fonction du $V_{REF}$	74
<b>Fig(III.10)</b>	Boucle de commande de la tension $V_q$	78
<b>Fig(III.11)</b>	Boucle de commande de la tension $V_d$	78
<b>Fig(III.12)</b>	Boucle de régulation de vitesse	78
<b>Fig(III.13)</b>	Schéma bloc de la commande vectorielle indirect	79
<b>Fig(III.14)</b>	courants de sortie dans le repère mobile dq	80
<b>Fig(III.15)</b>	les courants de sortie du phase $I_a$	80
<b>Fig(III.16)</b>	les flux magnétique dans le repère mobile dq	81
<b>Fig(III.17)</b>	comparaison entre couple résistant et le couple électromagnétique	81
<b>Fig(III.18)</b>	comparaison entre la vitesse de référence et la vitesse du moteur	81

# Chapitre IV

<b>Fig(IV.1)</b>	Chaîne de traction d'un véhicule électrique simplifié	84
<b>Fig(IV.2)</b>	Puissances nécessaires au niveau des organes de la chaîne de traction en fonction de vitesse	85
<b>Fig(IV.3)</b>	Rendement des organes de la chaîne de traction à vitesse constante	85
<b>Fig(IV.4)</b>	Chaîne de traction simplifiée	87
<b>Fig(IV.5)</b>	Evolution des grandeurs mécanique de la MS	88
<b>Fig(IV.6)</b>	Grandeurs électromagnétiques de la machine	89
<b>Fig(IV.7)</b>	Architecture d'une chaîne de traction (avec commande et conducteur).	91
<b>Fig(IV.8)</b>	Conditions de roulage (Exemple)	92
<b>Fig(IV.9)</b>	Evolution des grandeurs mécanique de la MS	93
<b>Fig(IV.10)</b>	Evolution des grandeurs électromagnétiques de la machine	94
<b>Fig(IV.11)</b>	Erreurs de poursuites commises sur la vitesse de la machine et du véhicule	95
<b>Fig(IV.12)</b>	Simulation de la décharge d'une batterie Li-ion	96

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1 :</b>	Top 15 les voitures électrique les plus vendus en Europe 2022	6
<b>Tableau I.2 :</b>	Part du marché de voitures électriques utilisées en Europe 2022	7
<b>Tableau II.1:</b>	Les différentes caractéristiques pour différents types de batteries	56

# Notations et définitions

## Acronymes

AC-DC	Convertisseur électrique alternatif / continu
DC-DC	Convertisseur électrique continu / continu
MSRB	Machine Synchrone à Rotor Bobiné
VE	Véhicule électrique
MLI	Modulation par largeur d'impulsion

## Notations

$P(\theta)$ :	La transformation de Park
$P$ :	Nombre de paires de pôles
$\omega_r$ :	Pulsation électrique
$L_{ss}$ :	La matrice inductance
$J$ :	Le moment d'inertie du moteur
$f_v$ :	Le coefficient de frottement visqueux
$C_m$ :	Le couple électromagnétique délivré par le moteur
$C_r$ :	Le couple résistant ou de charge
$L_d$ :	Inductance équivalente d'induit sur l'axe d
$L_q$ :	Inductance équivalente d'induit sur l'axe q
$R_s$ :	Résistance équivalente d'enroulement statorique
$L_f$ :	Inductance équivalente d'inducteur.
$M_f$ :	Mutuelle inductance entre stator et rotor
$R_f$ :	Resistance de l'inducteur
$P$ :	Nombre de paires de pôles
$\Omega$ :	La vitesse mécanique.
$A, b, c$ :	Indices correspondants aux trois phases
$d, q$ :	Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.

$\varphi$ :	Flux magnétique.
$\alpha, \beta$ :	Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au stator.
$v_{sd} v_{sq}$ :	Composantes de tension statorique dans le repère dq
$i_{sd} i_{sq}$ :	Composantes de courant statorique dans le repère d q
$v_f$ :	Composantes de tension d'inducteur
$i_f$ :	Composantes de courant statorique d'inducteur
$V_{batt}$	Tension aux bornes de la batterie.
$I_{batt}$	Courant dans la batterie

# Table des matières

Résumé.....	i
Liste des figures.....	ii
Liste des tableaux.....	iii
Liste des acronymes et notations.....	iv
Introduction général.....	1

## Chapitre I : Généralités sur les véhicules électriques

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Marché et évolution.....	6
I.4 Types des véhicules électriques.....	7
I.4.1 Véhicule toute électrique.....	8
I.4.1.1 Les VE à batteries rechargeables par prise de courant.....	8
I.4.1.2 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible.....	8
I.4.2 Le véhicule hybride.....	9
I.4.2.1 Véhicule hybride série.....	9
I.4.2.2 Véhicule hybride parallèle.....	10
I.4.2.3 Véhicule hybride combiné.....	10
I.5 La configuration des véhicules électriques.....	11
I.5.1 Véhicule électrique monomoteur.....	11
I.5.2 Véhicule électrique multi moteur.....	12
I.6 La structure d'un véhicule électrique.....	12
I.6.1 Carrosserie (véhicule).....	12
I.6.2 Batterie.....	13
I.6.3 Moteur électrique.....	13
I.6.4 Boite à convertisseurs de puissance.....	14
I.6.5 Transmission.....	14

I.7 Conclusion.....	16
---------------------	----

## **Chapitre II : Structure et modélisation d'un véhicule électrique**

II.1 Introduction.....	17
II.2 Modélisation du véhicule électrique.....	17
II.2.1 Modèle de véhicule.....	18
II.2.2 Modèle de transmission.....	26
II.2.2.1 Les engrenages (rapport de réduction).....	26
II.2.2.2 Les roulements.....	27
II.2.2.3 Le différentiel.....	27
II.2.2.4 Les cardans.....	28
II.2.3 Machine électrique.....	31
II.2.3.1 Généralités sur la machine synchrone .....	31
II.2.3.2 Machine synchrone à rotor bobiné .....	32
II.2.3.2.1 Principe, fonctionnement et modélisation .....	32
II.2.3.2.2 Mise en équations .....	33
II.2.3.2.3 Modélisation dans le repère diphasé.....	36
II.2.3.2.4 Modélisation dans le repère du champ tournant.....	36
II.2.3.2.5 Représentation d'état dans le repère dq.....	38
II.2.4 Electronique de puissance.....	41
II.2.4.1 Les hacheurs .....	42
A. Hacheur abaisseur (Buck ou série) .....	42
B. Hacheur élévateur (Boost ou parallèle) .....	42
C. Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) .....	42
II.2.4.1.1 Principe, fonctionnement et modélisation .....	43
A. Modèle mathématique d'un hacheur Buck.....	43

B. Modèle mathématique d'un hacheur Buck-Boost.....	46
II.2.4.2 Les onduleurs .....	48
II.2.4.2.1 Principe, fonctionnement et modélisation .....	49
A. Modèle mathématique d'un onduleur triphasé.....	49
II.2.5 Filtre LC.....	50
II.2.6 La batterie de traction.....	52
II.2.6.1 Les différents types de batterie.....	52
II.2.6.1.1 La batterie Plomb Acide. ....	53
II.2.6.1.2 Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd).....	53
II.2.6.1.3 Les batteries Nickel-hydrure-Métallique.....	54
II.2.6.1.4 Les batteries Lithium-Ion.....	55
II.2.6.2 Principe de fonctionnement.....	55
II.2.6.3 Modélisation de la batterie lithium.....	56
A. Modèle statique.....	56
B. Modèle dynamique.....	56
II.2.6.3.1 Etat de charge d'une cellule de la batterie.....	57
II.2.6.3.2 De la cellule au pack.....	60
II.3 Conclusion.....	62

### **Chapitre III : Etude de commande d'un système de puissance d'un véhicule électrique**

III.1 Introduction.....	63
III.2 Présentation du système de puissance étudié.....	63
III.3 Commande du système de puissance d'un véhicule électrique.....	65
III.3.1 Stratégie de commande des hacheurs.....	65
II.3.1.1 Hacheur Buck.....	66
II.3.1.2 Hacheur Buck-Boost.....	69

III.3.2	Stratégie de commande des onduleurs.....	71
II.3.2.1	MLI vectorielle.....	71
II.3.2.2	MLI triangulo-sinusoïdale.....	72
III.3.3	Stratégie de commande des moteurs.....	74
II.3.3.1	La commande scalaire.....	75
II.3.3.2	La commande directe du couple.....	75
II.3.3.3	La commande vectorielle.....	75
II.3.3.3.1	La commande vectorielle directe.....	75
II.3.3.3.1	La commande vectorielle indirecte.....	76
A.	Découplages des courants.....	77
B.	La boucle de commande.....	77
C.	La régulation de vitesse .....	78
III.3.4	Interprétations.....	81
III.4	Conclusion.....	82
<b>Chapitre IV : Association et simulation de la chaîne de traction</b>		
IV.1	Introduction.....	83
IV.2	Association des éléments de la chaîne de traction.....	83
IV.3	Autonomie de la chaîne de traction du véhicule électrique.....	86
IV.4	Simulation du fonctionnement de la chaîne de traction .....	87
IV.4.1	Première étape de simulation de la chaîne de traction .....	87
IV.4.2	Deuxième étape de simulation de la chaîne de traction.....	90
IV.5	Conclusion.....	97
	<b>Conclusion générale</b> .....	98
	<b>Références</b> .....	100
<b>Annexes</b>		

## Introduction générale

La réduction de la consommation des hydrocarbures et par conséquent les émissions polluantes dans le secteur automobile est un enjeu important, et le marché du véhicule propre s'ouvre donc de plus en plus. Ainsi, la nécessité de rendre les automobiles plus propres, conjugué au besoin naissant d'un nouveau type de consommateur de ce secteur, pousse les constructeurs à proposer des véhicules plus sobres [28]. Une solution, qui permet d'éviter la consommation de pétrole pour ce type d'application et de ne plus émettre de gaz à effets de serre notamment dans les milieux urbain.

Cependant, le passage d'un parc automobile mondial fonctionnant actuellement quasi exclusivement au pétrole, vers un parc d'automobiles exclusivement électriques, ne peut être réalisé directement. Il faut en effet respecter certaines contraintes industrielles et économiques incontournables. Le passage du véhicule conventionnel au véhicule électrique est donc un travail à réaliser pas à pas, en partant des technologies bien maîtrisées actuellement [29].

Ce secteur va donc entraîner dans les années à venir une activité importante des constructeurs en termes de recherche et de développement car de nombreuses solutions apparaissent et doivent faire leurs preuves. Aujourd'hui, des nombreux systèmes de gestion de l'énergie ont été définis pour les véhicules électriques. Mais il existe encore de nombreuses opportunités pour renforcer [4], simplifier les architectures électriques et améliorer l'adéquation entre le véhicule et son infrastructure de charge.

Les machines synchrones se distinguent des autres types de machines électriques par leur capacité à fonctionner à une vitesse de rotation constante synchronisée avec la fréquence du courant alternatif d'alimentation. Parmi les machines synchrones, on trouve les machines synchrones à rotor bobiné, qui se différencient des machines synchrones à rotor cage d'écureuil ou à aimants permanents.

Les machines synchrones à rotor bobiné offrent une plus grande flexibilité et un meilleur contrôle de la puissance réactive par rapport aux machines à rotor cage d'écureuil ou à aimants permanents. Cependant, elles sont souvent plus complexes et plus coûteuses à fabriquer et à entretenir.

L'objectif de ce mémoire est l'étude structurelle, la modélisation et l'étude de la commande d'une chaîne de traction pour véhicule électrique ainsi que l'association des éléments modélisé.

Le premier chapitre est consacré à l'étude et à la présentation des véhicules électriques ainsi que leurs évolutions à travers l'histoire, également nous nous penchons sur la constitution des organes de traction, un choix de configuration de propulsion du véhicule électrique sera présenté et justifié à la fin de ce chapitre.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à présenter et modéliser les modèles des différents éléments de la chaîne par un schéma de base qui contient : le modèle mécanique longitudinal du véhicule électrique(VE), le modèle de la batterie, du système de transmission, des convertisseurs statique et à modéliser l'actionneur électrique utilisé (MSRB).

Dans le troisième chapitre, nous avons exploré les différentes techniques de commande des hacheurs, d'onduleur et du moteur électrique, en mettant l'accent sur la commande vectorielle. La commande des hacheurs implique la modulation de la largeur des impulsions à l'aide d'un régulateur PI, ce qui permet de réguler avec précision la tension ou le courant fourni à la charge. Cette approche offre un contrôle fin de la puissance délivrée. Les onduleurs, de leur côté, convertissent le courant continu en courant alternatif de fréquence et d'amplitude variables. Cette conversion permet de contrôler la vitesse et le couple des moteurs électriques en utilisant la commande par module de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale, qui ajuste la largeur des impulsions pour obtenir la forme d'onde souhaitée. Enfin, la commande vectorielle des moteurs électriques vise à contrôler de manière indépendante le flux magnétique et le couple. Cela permet un fonctionnement optimal en termes de performances et d'efficacité, en ajustant précisément ces paramètres pour répondre aux besoins de l'application.

Le quatrième chapitre de ce mémoire est réservé à l'association et à la simulation des éléments de la chaîne de traction, mais aussi, nous nous présentons l'importance de la commande de la chaîne (pilotage de la chaîne) qui sera effectué avec l'intervention d'un conducteur. Après les présentations des schémas d'associations, nous effectuons plusieurs simulations pour montrer la validité des modèles étudiés et arriver à quelques discussions et conclusions.

Finalement, ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

***Chapitre I :***  
***Généralités sur les véhicules***  
***électriques***

## **I.1 Introduction**

Dans un temps où l'activité humaine et le potentiel économique ne cessent d'évoluer, le XX<sup>ème</sup> siècle a connu un réchauffement climatique jamais enregistré dans les temps de nos ancêtres. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration dans l'atmosphère de CO<sub>2</sub> et des autres gaz dus à l'activité humaine, [18],

Les véhicules électriques (VE) et hybrides constituent actuellement une alternative possible aux véhicules conventionnels, permettant aux constructeurs de véhicules de pouvoir répondre aux exigences demandées par les utilisateurs des véhicules (performances et consommation du carburant) et les lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants), [19].

Le véhicule électrique représente une révolution majeure dans l'industrie automobile, offrant une alternative prometteuse aux véhicules traditionnels fonctionnant à l'essence ou au diesel. Alimenté par des batteries rechargeables, le véhicule électrique présente de nombreux avantages, tels que des émissions réduites, une efficacité accrue et une plus grande durabilité. Dans ce chapitre consacré à l'état de l'art du véhicule électrique, nous explorerons l'histoire, les tendances du marché et la structure générale des véhicules électriques.

## **I.2 Historique**

La voiture électrique, que l'on présente d'ailleurs comme « la solution » au problème de la pollution des gaz d'échappement, n'est pas une idée qui date d'hier. A la fin du **XIX<sup>e</sup>** siècle au début de l'automobile, plusieurs modes de propulsion étaient en compétition (le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique) [1]. Ci-dessous on compte quelques véhicules électriques qui ont marqué l'histoire :

L'histoire du développement précoce des véhicules électriques (EV) est créditée aux inventeurs européens et américains. Cependant, elle remonte plus loin que cela, jusqu'en 1828, lorsque l'inventeur hongrois Ányos Jedlik a créé une voiture miniature alimentée par un moteur électrique de sa propre conception muni d'un stator, d'un rotor et d'un collecteur [2].

En 1835 L'inventeur Américain Thomas Davenport construit un jouet électrique locomotif, Il était alimenté par un moteur électrique primitif qu'il avait construit l'année précédente, dérivé des électro-aimants de Joseph Henry [2].

L'inventeur Robert Davidson, suite à la mode de l'électricité Il a commencé à expérimenter les moteurs électriques en 1827 et créé la première locomotive électrique de taille réelle surnommée « Galvani » en 1842. Il a été testé sur le Edinburgh-Glasgow en l'écosse la même année, à une vitesse de 6.5Km/h sans passagers à bord. Ce véhicule à quatre roues par des batteries jetables, comme tous les autres véhicules électriques de cette période [2].

En 1884, Thomas Parker construisit une voiture électrique plus performante, alimentée par les batteries rechargeables de sa société Elwell-Parker [2].



**Figure I.1 :** Le véhicule électrique crée par Thomas Parker en 1835 [3].

En 1899 en Royaume-Uni, La Jamais Contente, la première voiture électrique qui a dépassé les 100 km/h a été construite [4]. La voiture était pilotée par le Belge Camille Jenatzy et elle était en forme de torpille.



**Figure I.2 :** La jamais contente conçue par Camille Jenatzy [5].

Dans les années 1920 jusqu'à 1970, la voiture électrique tomber sur une chute contre les voitures essence pour certains plusieurs facteurs comme la faible autonomie, la vitesse trop basse, le manque de puissance, la disponibilité du pétrole, tous ces causes menées au déclin de la voiture électrique.

Dans les années 1970, les soucis sur le prix de flambée du pétrole, ce qui a atteint un sommet avec l'embargo sur le pétrole arabe en 1973, et le mouvement environnemental croissant ont mené à un intérêt renouvelé dans les voitures électriques à la fois chez les consommateurs et les producteurs, [6].

En 1972, Victor Wouk, le «parrain du Hybrid» a construit le premier véhicule hybride à pleine puissance, à pleine grandeur sur la base de l'auto Buick Skylark 1972 prévue par Général Motors (G.M.), [7].



**Figure I.3 :** Victor Wouk avec la Buick Skylark en 1972, [7].

Aujourd'hui, le véhicule électrique est devenu une réalité. Les principaux constructeurs automobiles, à l'image de Renault avec la ZOE (Figure I.4) en 2013, ont développé un modèle 100% électrique et non un seul véhicule électrifié. Les installations de bornes de recharge sont aujourd'hui de plus en plus nombreuses.



**Figure I.4 :** Exemple d'un VE d'aujourd'hui Renault Zoé.

### I.3 Marché et évolution

Le marché des voitures électriques a connu une croissance rapide ces dernières années, stimulé par la demande croissante de véhicules plus écologiques et plus économiques en carburant. Voici une vue d'ensemble de l'évolution du marché des véhicules électriques :

- Au début des années 2000, les ventes de voitures électriques étaient très faibles, avec seulement quelques modèles disponibles sur le marché et une portée limitée.
- Cependant, à partir de 2010, les ventes de voitures électriques ont commencé à augmenter rapidement, stimulées par les avancées technologiques en matière de batteries, l'amélioration de la portée des véhicules et les mesures incitatives des gouvernements pour promouvoir l'adoption de voitures électriques.
- En 2013, la Nissan Leaf est devenue la première voiture électrique à dépasser les 100 000 ventes dans le monde, et en 2015, Tesla a lancé le Model S, une voiture électrique de luxe qui a rapidement connu un grand succès.
- En 2017, les ventes de voitures électriques ont dépassé pour la première fois le million d'unités dans le monde, avec une croissance annuelle de plus de 50%.
- De janvier à novembre 2022, plus de 6,3 millions de véhicules 100% électriques se sont vendus dans le monde, contre plus de 4,6 millions sur l'intégralité de l'année 2021, [8].

**Tableau I.1** : Top 15 les voitures électrique les plus vendus en Europe 2022, [9].

		Units	vs H1 21
1	Tesla Model Y	44,472	new
2	Tesla Model 3	39,896	-40%
3	Fiat 500	32,777	+70%
4	Peugeot 208	22,899	+13%
5	Volkswagen ID.4	22,619	-6%
6	Kia Niro	22,534	+8%
7	Skoda Enyaq	21,492	+53%
8	Renault Zoe	20,903	-32%
9	Hyundai Kona	19,954	-9%
10	Dacia Spring	19,687	+571%
11	Volkswagen ID.3	17,246	-44%
12	Hyundai IONIQ 5	17,096	new
13	Mini Hatch	15,083	+26%
14	Renault Twingo	14,756	+28%
15	Opel/Vauxhall Corsa	13,710	+5%

Les prévisions pour l'avenir sont très optimistes, avec de nombreux experts prévoyant une croissance exponentielle du marché des voitures électriques au cours de la prochaine décennie. Selon les études statistiques, les ventes de voitures électriques pourraient atteindre 10 millions d'unités d'ici 2025 et représenter environ 28% des ventes de voitures neuves dans le monde d'ici 2030.

**Tableau I.2** : part du marché de voitures électriques utilisées en Europe 2022 [9].

Top 10 as % of market's total	Norway	78%
	Sweden	28%
	Iceland	27%
	Netherlands	19%
	Switzerland	16%
	Denmark	16%
	Luxembourg	15%
	UK	14%
	Finland	14%
	Austria	13%

En résumé, le marché des voitures électriques connaît une croissance rapide avec une concurrence américaine, européenne, chinoise et devrait continuer de se développer à l'avenir, stimulé par des avancées technologiques, des réglementations plus strictes en matière d'émissions et une demande croissante des consommateurs pour des véhicules plus écologiques et plus économiques en carburant.

#### I.4 Types des véhicules électriques

Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, etc. Beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions des VE sont explorées sur le véhicule électrique pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le transport, le stockage et l'utilisation de l'électricité, [4].

Les VH font partie de la famille des véhicules électrifiés qui désigne l'ensemble des véhicules hybrides, hybrides rechargeables et électriques. A l'intérieur de ces familles, plusieurs sous-catégories peuvent exister, [4].

### **I.4.1 Véhicule toute électrique**

#### **I.4.1.1 Les VE à batteries rechargeables par prise de courant**

Les véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant, également appelés véhicules électriques à batterie ou BEV (Battery Electric Vehicle), ce sont des véhicules qui fonctionnent avec des batteries rechargeables, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19<sup>ème</sup> siècle, il est, de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement, [4]. Le temps de recharge varie en fonction de la capacité de la batterie et du type de chargeur utilisé, allant de quelques heures pour une recharge complète à domicile, jusqu'à environ 30 minutes pour une recharge rapide en utilisant une borne de recharge rapide.

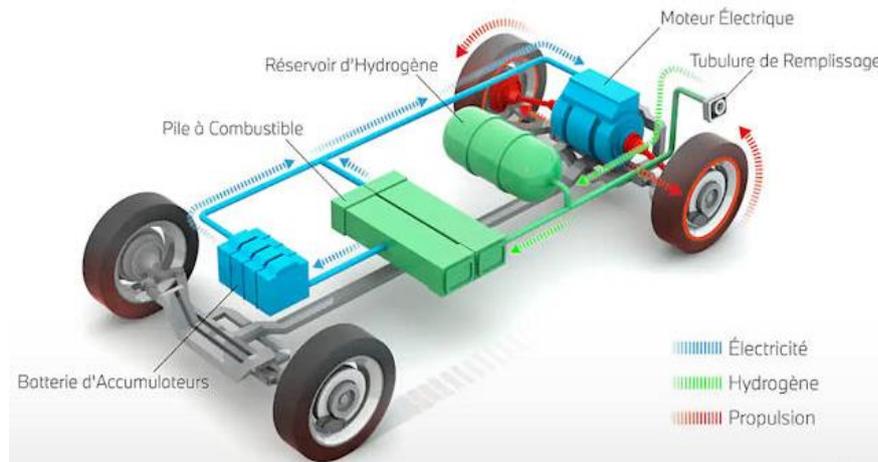


**Figure I.5 :** Exemple d'une VE batteries rechargeables par prise de courant

#### **I.4.1.2 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible**

Les véhicules électriques à alimentation par pile à combustible, également appelés véhicules électriques à hydrogène ou FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle), sont des véhicules qui utilisent une pile à combustible pour produire de l'électricité à partir

d'hydrogène. Cette électricité est ensuite utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques qui propulsent les roues. L'application de cette technologie dans le domaine automobile est assez récente et relève encore de l'expérimentation. La pile à combustible existe depuis près de deux cents ans. Elle fut inventée en Angleterre au début du 19<sup>ème</sup> siècle par deux anglais, Sir Henry Davy et Sir William Grove [4].



**Figure I.6 :** Structure d'une VE à alimentation par pile à combustible

## I.4.2 Le véhicule hybride

On qualifie de véhicule hybride un véhicule qui associe au moins deux types de sources d'énergie et donc de type de moteurs différents pour assurer sa propulsion, [10]. Pour les véhicules hybrides électriques (VHE) il s'agit d'une association d'un moteur thermique et d'un moteur électrique, c'est donc un véhicule qui dispose d'au moins deux sources d'énergie, une pour assurer l'alimentation du moteur thermique et l'autre pour le moteur électrique. Dans la littérature il existe plusieurs définitions d'un véhicule hybride, [11].

On distingue trois types principaux de système d'entraînement hybrides : parallèle, série et combiné.

### I.4.2.1 Véhicule hybride série

La technologie série sépare complètement la production d'énergie et son utilisation pour l'entraînement des roues. Le véhicule est propulsé entièrement par le moteur électrique (figure 1.7) et le moteur thermique sert à fournir l'énergie électrique. Cette énergie est emmagasinée ou directement utilisée pour entraîner un ou plusieurs moteurs électriques qui fournissent la puissance nécessaire pour propulser le véhicule. Il n'y a aucun lien mécanique entre les deux moteurs [12].

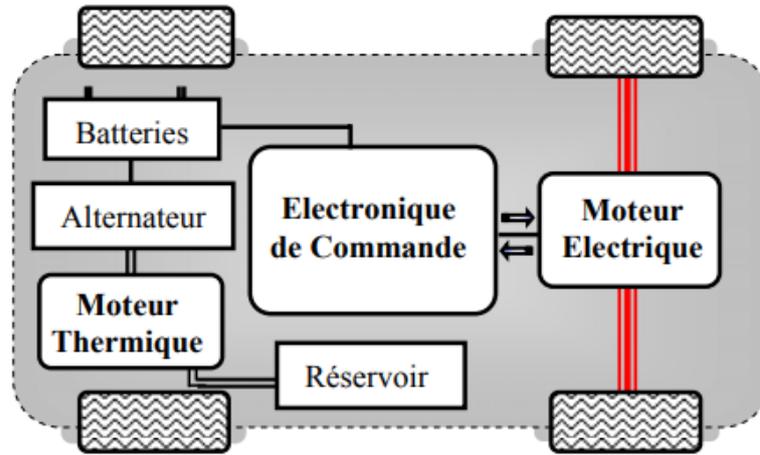


Figure I.7 : Exemple schématique d'architecture série, [12].

#### I.4.2.2 Véhicule hybride parallèle

Dans cette configuration, le véhicule est équipé d'une double propulsion thermique et électrique (Figure 1.7). Les atouts du système parallèle résident dans le fait que l'on peut combiner ou superposer les deux entraînements, la propulsion est électrique et/ou thermique. Le moteur thermique est utilisé à haute vitesse et le système électrique est utilisé comme appoint pour les accélérations, la récupération et éventuellement sur les côtes et au démarrage [12].

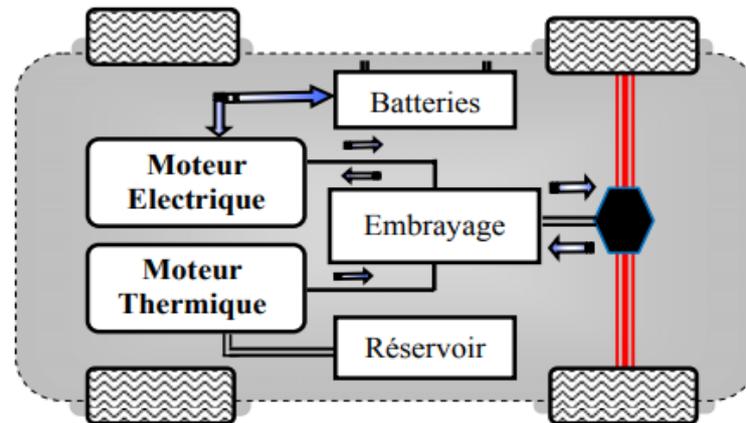


Figure I.8 : Exemple schématique d'architecture parallèle [12].

#### I.4.2.3 Véhicule hybride combiné

D'autres architectures combinant les motorisations thermiques et électriques peuvent aussi être envisagées pour associer sur un même véhicule les fonctionnements en hybride série et en hybride parallèle, par exemple en utilisant un train épicycloïdal (Figure I.9). En

multipliant les flux d'énergie possibles, ces architectures offrent un plus grand potentiel de gain en consommation. Par contre, elles multiplient également le nombre de composants et complexifient leurs liens, [13].

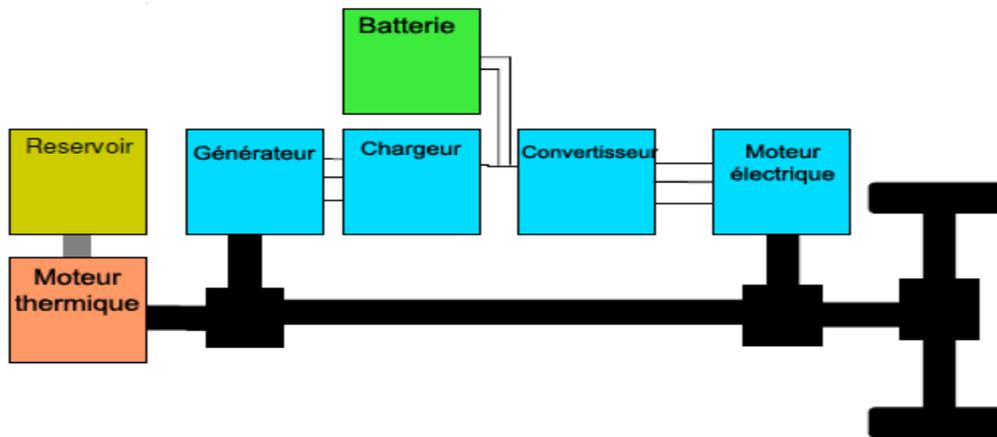


Figure I.9 : Exemple schématique d'architecture combiné, [13].

## I.5 La configuration des véhicules électriques

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

### I.5.1 Véhicule électrique monomoteur

Un véhicule électrique mono moteur est un type de véhicule électrique qui utilise un seul moteur électrique pour propulser les roues. Contrairement aux véhicules hybrides, un véhicule électrique mono moteur n'a pas de moteur à combustion interne pour alimenter la propulsion.

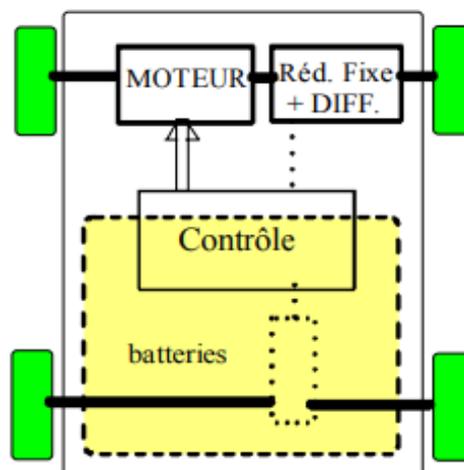


Figure I.10 : Exemple schématique de motorisation monomoteur [5].

### I.5.2 Véhicule électrique multi moteur

Il peut à priori sembler intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme le différentiel et les doubles joints de cardans, nécessaires dans les deux solutions précédentes. Cela constitue encore un pas, après la suppression de la boîte de vitesses et de l'embrayage, vers la simplification de la chaîne de transmission mécanique. On peut ainsi réaliser des solutions à deux roues motrices soit à l'avant, soit à l'arrière ou encore des solutions à quatre roues motrices, [14].

On peut donc réaliser des véhicules à deux roues motrices, ou encore à quatre roues motrices Figure (I.11), [5].

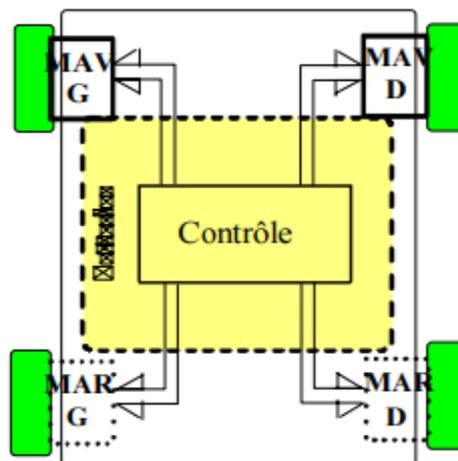


Figure I.11 : Exemple schématique de motorisation multi-moteur, [5].

## I.6 La structure d'un véhicule électrique

La structure d'un véhicule électrique comprend plusieurs éléments clés qui lui permettent de fonctionner correctement :

### I.6.1 Carrosserie (véhicule) :

La carrosserie est la structure extérieure du véhicule électrique, qui est conçue pour assurer la sécurité des occupants et des piétons, ainsi que pour améliorer l'aérodynamisme et l'esthétique du véhicule.



**Figure I.12 :** Carrosserie standard d'un véhicule

### I.6.2 Batterie :

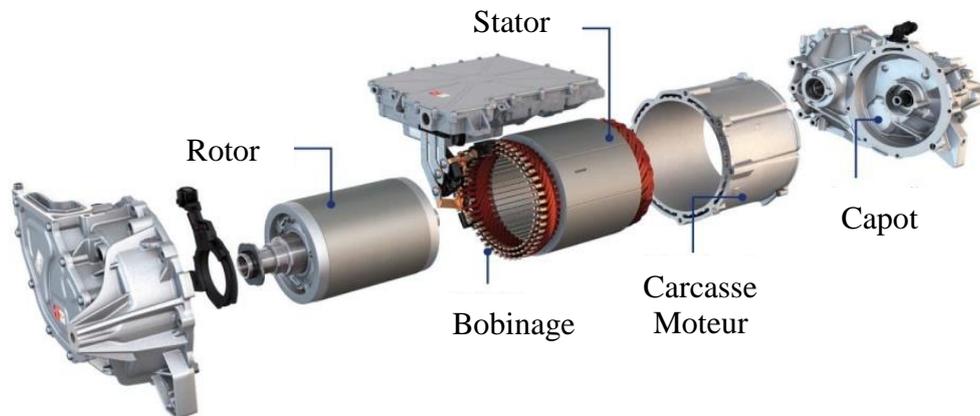
Les véhicules électriques actuels ont des batteries au Lithium-ion (ou Li-ion). Ces packs de batteries sont un assemblage de dizaines ou centaines de cellules, en série ou en parallèle. Les cellules sont composées d'électrodes en mélanges composites. L'anode négative est généralement à base de carbone. La cathode positive peut être formée de différentes chimies, [16].



**Figure I.13 :** Exemple de batterie Lithium-Ion d'un Véhicule électrique.

### I.6.3 Moteur électrique

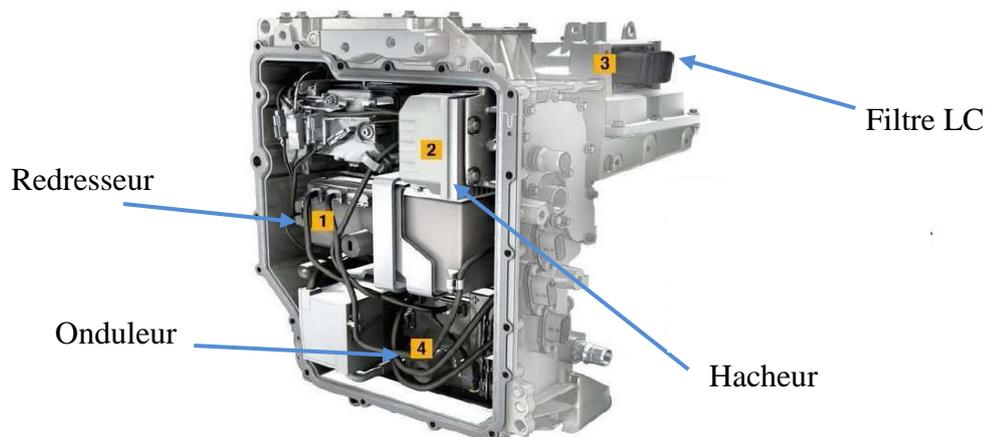
C'est un composant très simple au cœur de la voiture électrique, il joue sur les forces d'interactions (vecteurs forces) entre le rotor et le stator. Il est utilisé pour convertir l'énergie électrique qui provient de la source, en énergie mécanique utilisée pour propulser le véhicule durant les phases de traction, ou inversement l'énergie mécanique en énergie électrique lors des phases de freinage, pour permettre la récupération d'énergie (régénération). Lors du freinage, la chaîne mécanique devient en partie la source de puissance, et la source d'énergie principale (batterie) devient le récepteur [15], chacun des constructeur automobile choisi un type de moteur selon leurs besoin.



**Figure I.14 :** Bloc moteur d'un véhicule électrique

#### I.6.4 Boîte à Convertisseur de puissance :

Le domaine de l'électronique concerne toutes les applications liées à l'utilisation des composants « actifs », parmi ces utilisations on peut citer la voiture électrique qui nécessite d'une boîte liée au moteur qui contient trois dispositifs d'électronique de puissance tels que l'onduleur, les hacheurs et le redresseur. Le contrôleur de moteur (la partie puissance) régule la puissance fournie par la batterie au moteur électrique, en fonction des besoins de conduite, Tels que le réglage de la tension et la transformation de sa forme.



**Figure I.15 :** Boîte à convertisseur de puissance d'un véhicule électrique

#### I.6.5 Transmission

La transmission d'un véhicule électrique est généralement composée d'un réducteur mono rapport intégrant un différentiel mécanique. L'intérêt de ce réducteur est de pouvoir

différencier la vitesse des roues avec celle du moteur pour avoir un moteur qui tourne plus vite, et donc avec moins de couple, qui permettra d'avoir un moteur plus compact, [16]. Elle se compose de plusieurs composants mécaniques tels que les engrenages et les roulements pour la facilité de roulage.



Figure I.16 : Bloc de transmission

Pour résumer la structure du véhicule électrique nous avons proposé le schéma général ci-dessus qui résume les différents composants structurels de base d'un véhicule électrique :

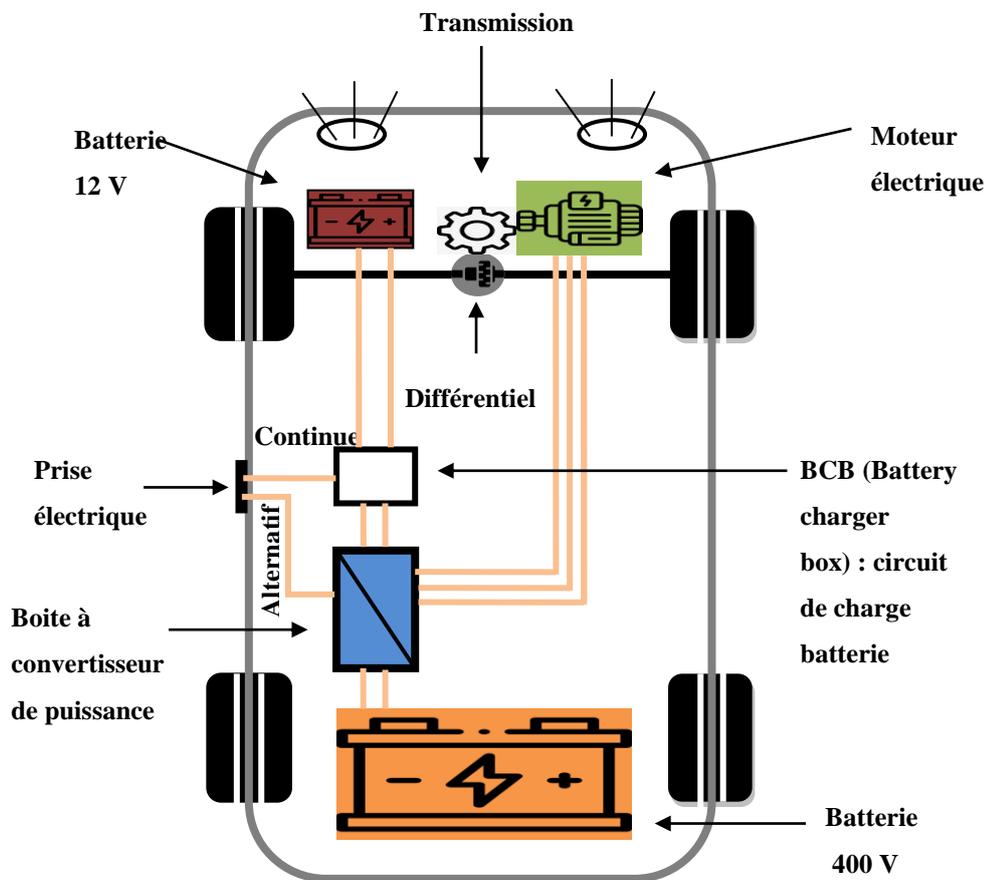


Figure I.17 : Schéma Structure de base d'un véhicule électrique

**I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des systèmes de traction des véhicules électriques, nous présentons son historique, et les différentes architectures qui prennent en compte les sources d'énergie utilisées et les types de moteurs utilisés dans le véhicule. , nous avons également évoqué l'évolution de l'utilisation des véhicules électriques dans le monde et les différents défis rencontrés. Nous constatons que les systèmes de traction des véhicules électriques sont des systèmes multidisciplinaires dans lesquels de nombreuses technologies électriques, mécaniques, thermiques, énergétiques, chimiques et aérodynamiques sont interdépendantes pour former le modèle de système dit de chaîne de traction. Nous fournissons également des statistiques sur l'utilisation des véhicules électriques dans le monde et parlons de la concurrence qui a existé en termes de volume ces dernières années.

Dans le chapitre suivant nous allons voir la structure détaillé d'un véhicule électrique et ces composants, nous allons aussi faire une modélisation et simulation pour chaque élément.

***Chapitre II :***  
***Structure et modélisation d'un***  
***véhicule électrique***

### II.1 Introduction :

Les véhicules électriques ont une conception très simplifiée par rapport aux véhicules thermiques, car il n'a pas besoin d'une boîte à multi-vitesses, ou bien le système d'échappement. Dans le contexte de la traction électrique, le véhicule possède plusieurs modèles qui permettent le bon fonctionnement.

L'étude et la modélisation de ce système est très délicat vue les nombreux paramètres et variables à prendre en compte. Dans ce chapitre on va définir la structure détaillé d'un véhicule électrique ainsi que la modélisation mathématique et schématique par le logiciel Matlab-Simulink de chacun des composants, d'où ce modèle prend en compte les forces agissant sur le véhicule.

### II.2 Modélisation du véhicule électrique

Il n'y a pas une unique possibilité pour connecter les modèles des composants entre eux. Le choix dépend de ce que le constructeur cherche à simuler. Sur un véhicule. Le conducteur donne une consigne de vitesse en appuyant sur la pédale d'accélérateur. Celle-ci est transmise à l'organe de commande qui génère à son tour la référence à la partie puissance qui donne la tension et fréquence à imposer à la machine électrique afin qu'elle produise la vitesse voulue. La vitesse du véhicule est alors une conséquence [16].

La Figure (II.1) résume les types de modèles développés dans le cadre de notre travail d'où on va ignorer le modèle thermique dans notre travail et donc on a :

**Modèle électrique (partie puissance) :** d'où l'énergie électrique ce circule de la batterie en passant par les différents convertisseurs jusqu'à le moteur électrique.

**Modèle mécanique :** baser sur la théorie d'entraînement électrique avec un moteur à rotor bobiné à la transmission ce qui entraîne par des conditions de roulage précise.

**Modèle thermique :** baser sur l'état des composants de traction en revanche les véhicules électriques possède un système de refroidissement basé sur un compresseur d'air. Ce modèle est négligeable dans notre étude.

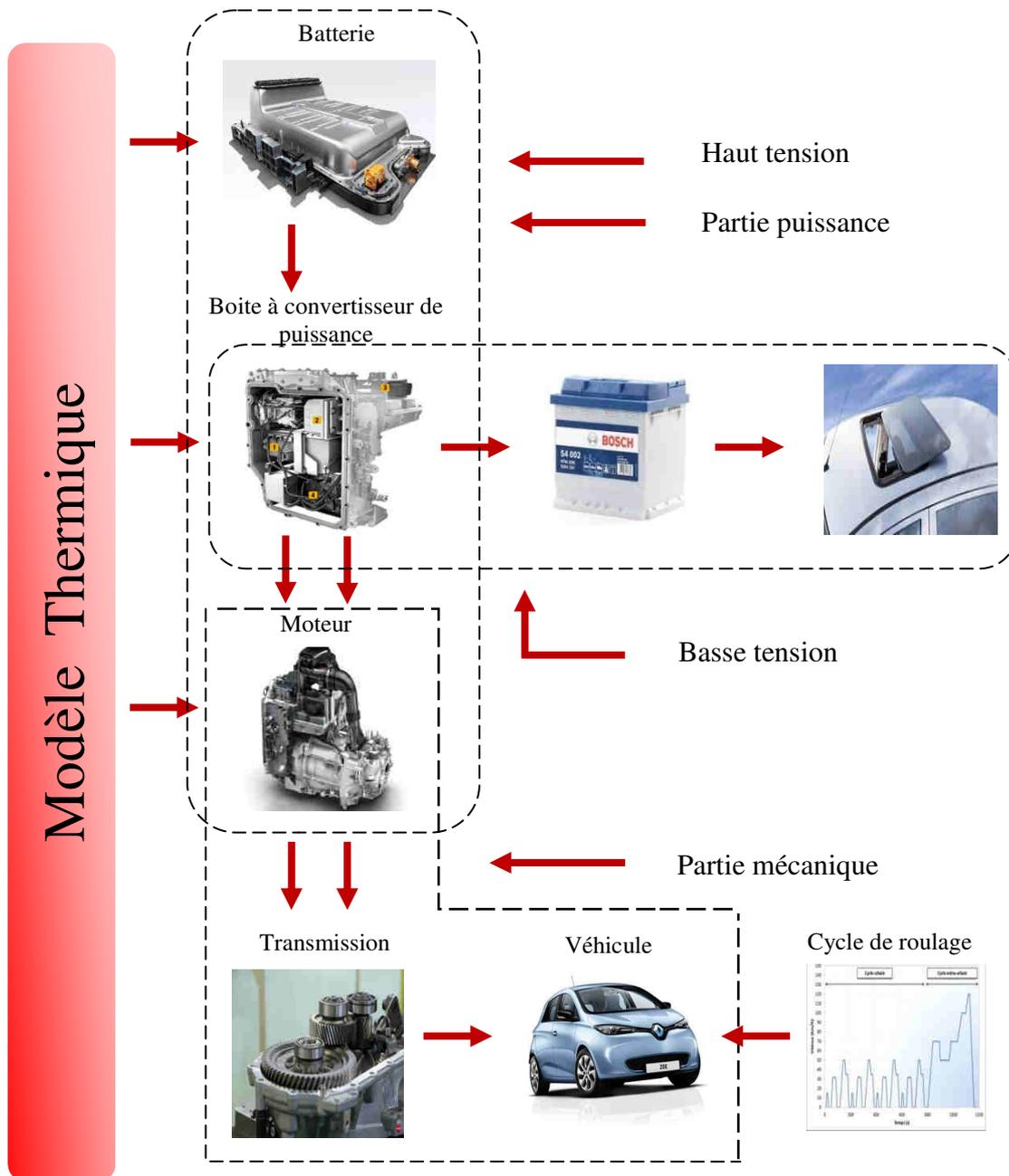
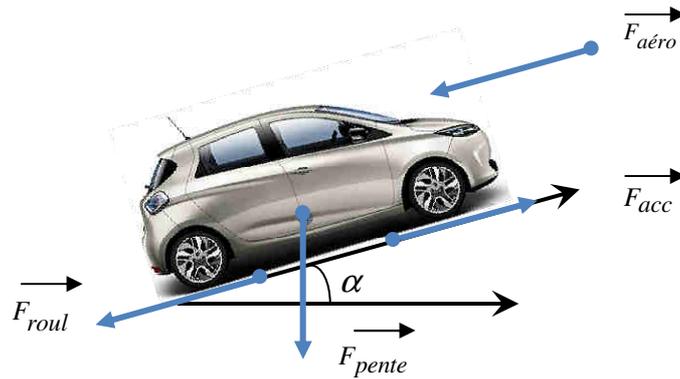


Figure II.1 : Modèle de base d'un véhicule électrique.

### II.2.1 Modèle de véhicule :

Le modèle du véhicule permet d'estimer les couples et les vitesses demandés à la roue pour pouvoir suivre un profil de vitesse en fonction du temps [20]. Pour cela on distingue plusieurs forces qui ce va appliquer sur la véhicule.

La Figure 2.14 schématise les forces appliquées sur un véhicule:



**Figure II.2 :** Les forces appliquées sur le véhicule.

Il existe plusieurs forces appliquées sur le véhicule pendant le roulage, mais on s'intéresse par quatre forces seulement:

- La force liée à la résistance aérodynamique.
- La force liée à la résistance au roulement des pneus.
- La force liée à la pente de la route.
- La force liée à l'accélération du véhicule.

#### Les équations des forces :

- La force liée à la résistance aérodynamique  $F_{aéro}$ .

La force aérodynamique est une force qui oppose le véhicule, elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot \rho(T_{ext}) \cdot S_f \cdot C_x \cdot V_{veh\_moy}^2 \quad (II.1)$$

Avec:

$T_{ext}$  : Température de l'air extérieur [°C].

$S_f$  : Section frontale du véhicule [m<sup>2</sup>].

$C_x$  : Coefficient de pénétration dans l'air.

$V_{veh\_moy}$  : vitesse véhicule moyenne entre deux points du cycle de roulage

$\rho$  : Masse volumique de l'air [kg/m<sup>3</sup>] recalculée en fonction de la température extérieure  $T_{ext}$ . Elle peut être calculée par cette équation :

$$\rho = \frac{p}{R_{spécifique} T_{ext}} \quad (II.2)$$

Avec :

$p$  : Pression atmosphérique absolue [*bar*]

$R_{spécifique}$  : Constante spécifique du gaz (l'air).

➤ Force pour vaincre une pente  $F_{pente}$  :

La force pour vaincre une pente (voire figure II.1) peut être donnée par :

$$F_{pente} = M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha(t)) = M_{veh} \cdot g \cdot pe_{moyen} \quad (II.3)$$

Avec :

$g$  : Accélération de la pesanteur [*m / s<sup>2</sup>*]

$M_{veh}$  : Masse du véhicule [*kg*], qui inclue la masse calculée des composants de la chaîne de traction.

$\alpha$  : Angle de la pente.

$pe$  : Pente moyenne de la route entre 2 points du cycle

L'équation de la masse totale d'un véhicule peut être donnée par :

$$M_{veh} = M_{veh\_vide} + M_{charge} + M_{trans} + M_{mot} + M_{ond} + M_{batt} \quad (II.4)$$

Avec :

$M_{veh\_vide}$  : Masse du véhicule à vide hors chaîne de traction [*kg*]

$M_{charge}$  : Charge du véhicule [*kg*] (passagers et masse supplémentaire), cette masse peut varier en fonction des points de performances (performances à vide et en charge différentes)

$M_{trans}$  : Masse de la transmission [*kg*]

$M_{mot}$  : Masse du moteur [*kg*]

$M_{ond}$  : Masse de l'onduleur [*kg*]

$M_{batt}$  : Masse de la batterie [*kg*]

Exemple pour la définition de la pente : Dans la littérature, une pente à x% correspond à une montée de x mètres tous les 100 mètres (réellement) parcourus par le véhicule (Figure II.3).

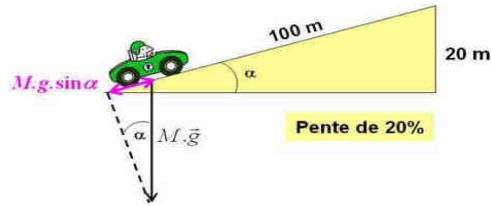


Figure II.3 : Schéma simplifié pour la détermination de la pente.

$$F_{pente} = M \cdot g \cdot \sin \alpha = M \cdot g \cdot p_{\%} \quad (\text{II.5})$$

$$\sin \alpha = p_{\%} = \frac{20}{100} = 0.2$$

**Remarque :** Cette exemple est juste pour la démonstration car dans le génie civil n'existe pas une pente plus de 10%.

➤ Force de résistance au roulement :

La force de résistance au roulement est due à la liaison pneumatique-sol. L'expression de cette force dépend uniquement de la masse et d'un coefficient constant  $CRR_{moy}$  (Coefficient de Résistance au Roulement). La vitesse du véhicule n'est pas prise en compte. Cette forme est très souvent utilisée dans la littérature.

$$F_{pneu} = CRR(V_{veh}) \cdot M_{veh} \cdot g \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$CRR$  : Coefficient de résistance au roulement,

$g$  : Accélération de la pesanteur [ $m / s^2$ ].

$M_{veh}$  : Masse du véhicule [ $m / s^2$ ]

➤ Force liée à l'accélération :

L'équation de la force liée a l'accélération peut être exprimée par :

$$F_{accel} = \left( M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \gamma = \left( M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \dot{V}_{veh} \cdot A \quad (\text{II.7})$$

Avec:

$R_{roue}$  : Rayon de la roue [ $m$ ]

$\gamma$  : L'accélération du véhicule [ $m/s^2$ ]

$J_{tot}$  : L'inertie totale ramené à la roue [ $Kg.m^2$ ]

La part de l'inertie dans la force d'accélération n'est pas négligeable, en particulier l'inertie du moteur qui peut ajouter jusqu'à l'équivalent de 100 kg au véhicule. L'inertie est obtenue par, dans le cas d'un réducteur avec 2 étages de réduction (figure II.8).

$$J_{tot} = \eta_{roue} \cdot J_{roue} + J_{BD} + J_{AS} \cdot K_{AS/BD2} + (J_{AB} + J_{mot}) \cdot K_{AP/BD2} \quad (II.8)$$

Avec :

$J_{roue}$  : Inertie d'une roue [ $Kg.m^2$ ]

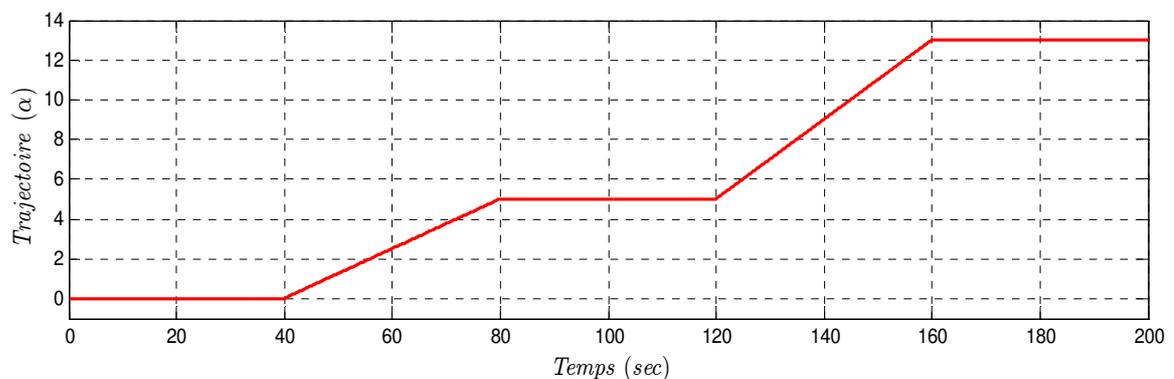
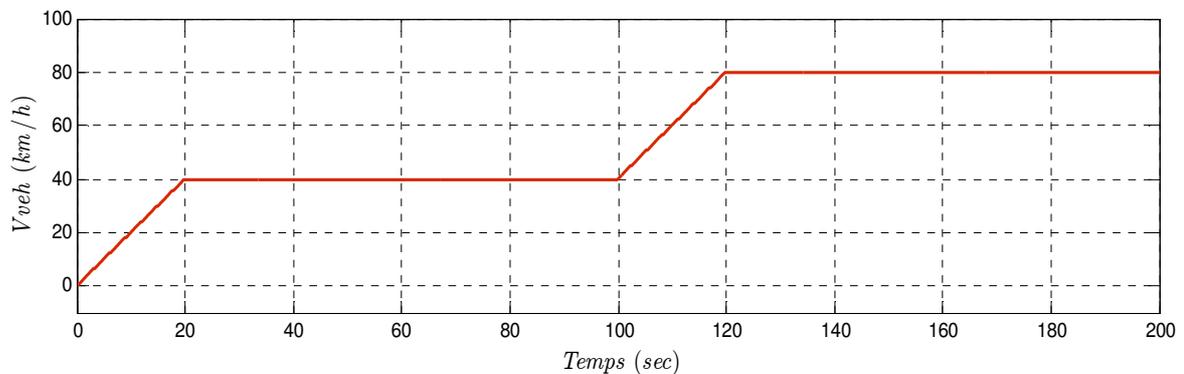
$J_{BD}$  : Inertie du bloc différentiel [ $Kg.m^2$ ]

$J_{AS}$  : Inertie de l'arbre secondaire du réducteur [ $Kg.m^2$ ]

$J_{AP}$  : Inertie de l'arbre primaire du réducteur [ $Kg.m^2$ ]

$J_{mot}$  : Inertie du rotor de la machine [ $Kg.m^2$ ]

**Exemple :** Pour une vitesse et une trajectoire donnée dans les figures suivantes :



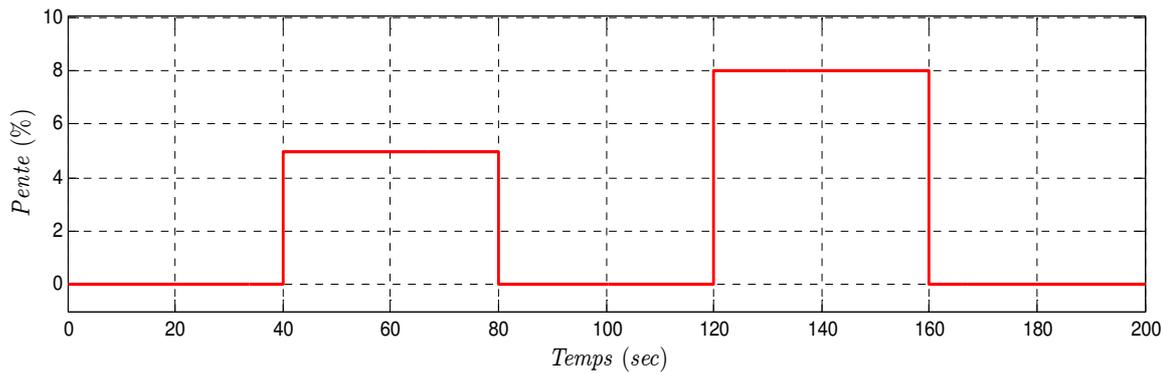
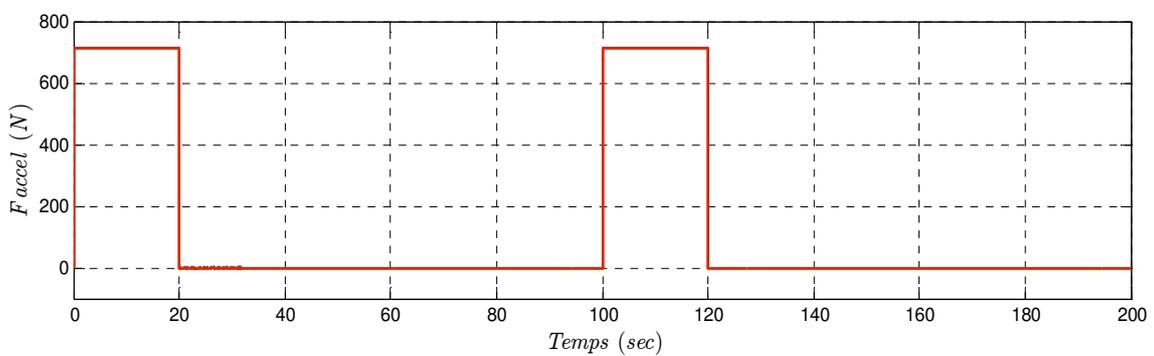
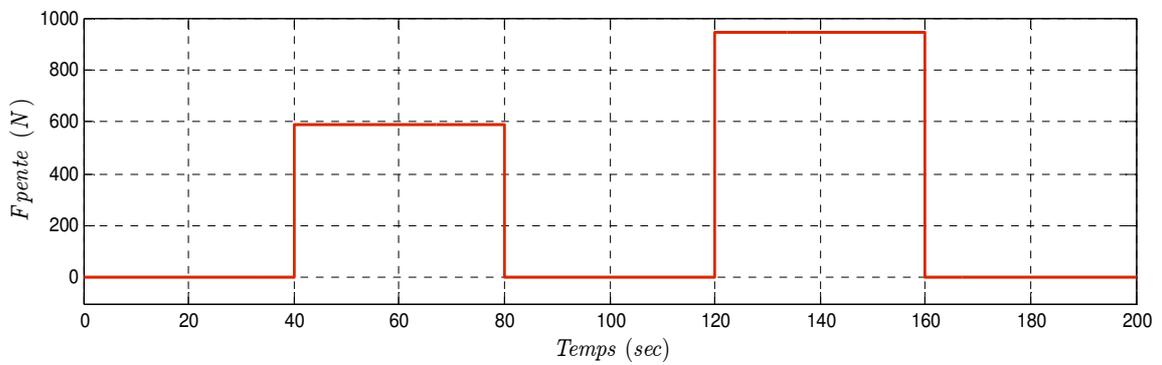
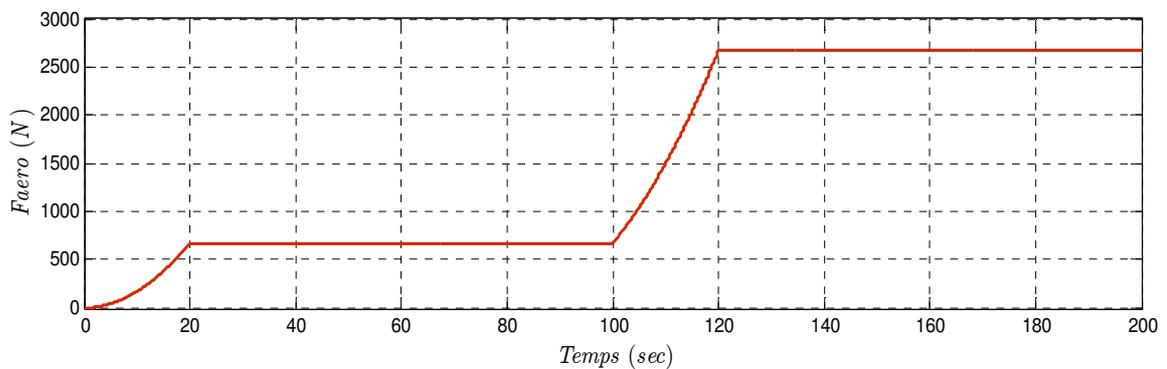
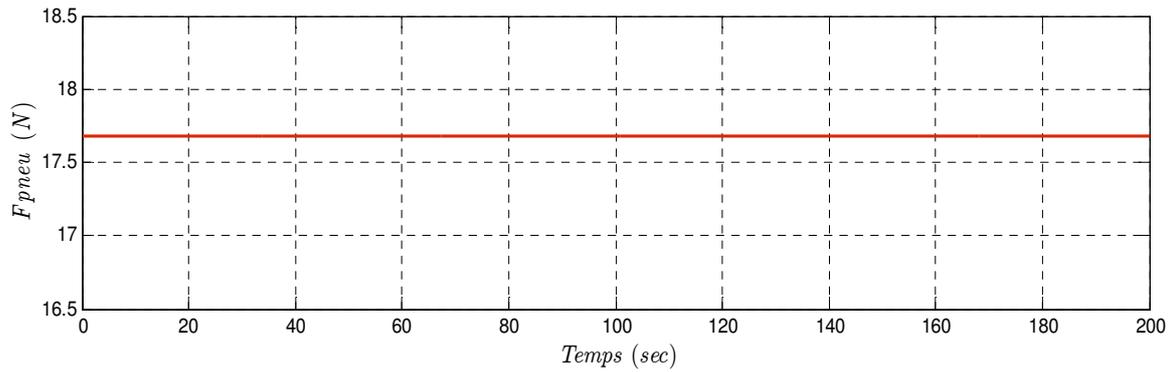


Figure II.4: Conditions de roulage (Exemple)

D'après les équations précédentes, en tenant compte les paramètres dans l'annexe A, on peut aussi simuler les différents forcer liée au véhicule :





**Figure II.5:** Forces appliqués au véhicule

**Les équations du couple et vitesse:**

On déduit de l'expression ci-dessus le couple résistant et la vitesse appliqué à la machine dans le cas d'un réducteur sans perte :

$$\Omega_{trans}(t) = \frac{1}{R_{roue}} V_{veh\_moyen} \tag{II.9}$$

$$C_{trans}(t) = R_{roue} \cdot \frac{(F_{aéro} + F_{pneu} + F_{pente} + F_{accel})}{\eta_{cardan}} \tag{II.10}$$

Avec:

$\Omega_{trans}$  : Vitesse des roues et du bloc différentiel [rad / s].

$C_{trans}$  : Couple nécessaire au bloc différentiel [N.m].

$\eta_{cardan}$  : Rendement des joints de cardan.

$R_{roue}$  : Rayon de la roue [m].

$V_{veh}$  : Vitesse véhicule [m / s].

$V_{veh\_moyen}$  : Vitesse véhicule moyenne entre 2 points du cycle [m/s], on prend la moyenne pour pouvoir intégrer l'accélération qui nécessite 2 points (t et t+I).

$F_{aéro}$  : Force liée à la résistance aérodynamique [N].

$F_{pneu}$  : Force liée à la résistance au roulement des pneus [N].

$F_{pente}$  : Force liée à la pente de la route [N].

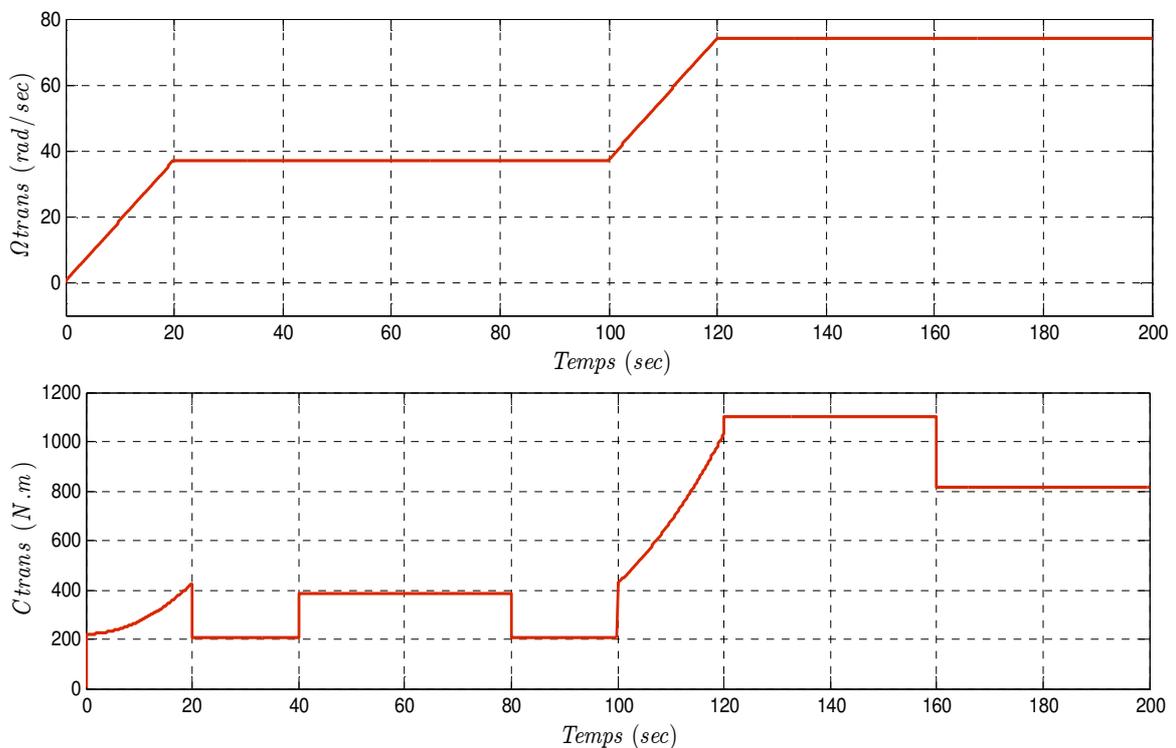
$F_{accel}$  : Force liée à l'accélération [N].

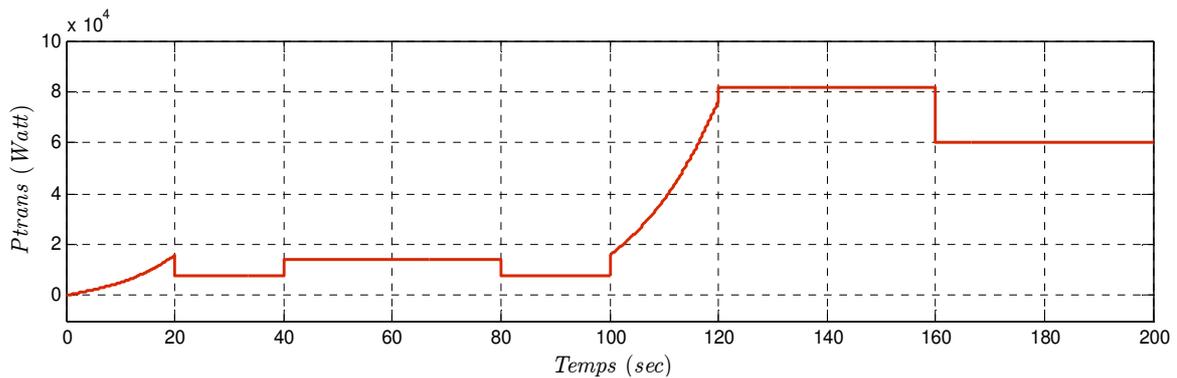
Chaque valeur de  $[C_{trans}, \Omega_{trans}]$  représente ce qu'on appellera par la suite un point de fonctionnement. Pour un cycle de x points, on aura donc x-1 points de fonctionnement. Les performances que doit respecter le véhicule seront représentées par des cycles élémentaires de 2 points. Enfin, le modèle du véhicule sera résumé par la figure suivante :



Figure II.6: Représentation simplifié du modèle véhicule.

En tenant compte des conditions de roulage donnés par la figure II.4 et des forces obtenues par la figure II.5 (les paramètres du véhicule sont donnés par l'annexe 1) les résultats obtenues à partir du modèle précédents du véhicule, qui sont le couple, la vitesse et la puissance demandés à la sortie du système transmission, sont les suivants :





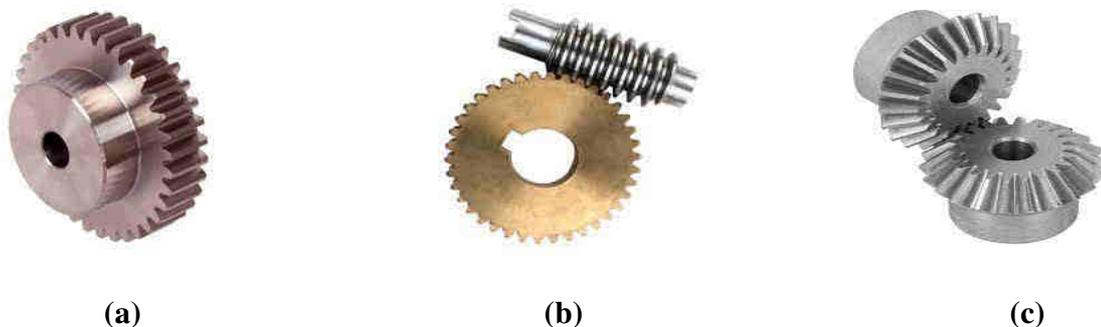
**Figure II.7:** Couple, vitesse et puissance de transmission

## II.2.2 Modèle de transmission

La transmission d'un véhicule électrique est le mécanisme qui transmet la puissance du moteur électrique aux roues, permettant au véhicule de se déplacer. Comparée à la transmission d'un véhicule à combustion interne, la transmission d'un véhicule électrique est généralement plus simple et plus efficace, car les moteurs électriques ne nécessitent pas de boîte de vitesses complexe pour fonctionner efficacement à différentes vitesses. Elle se compose de plusieurs éléments mécaniques cruciaux tels que :

### II.2.2.1 Les engrenages (rapport de réduction) :

Dans les véhicules électriques, les engrenages de transmission sont utilisés pour transmettre la puissance du moteur électrique aux roues. Contrairement aux véhicules à essence, les véhicules électriques n'ont pas besoin de boîte de vitesses complexe pour changer de vitesse, car le couple élevé du moteur électrique permet de fournir une accélération rapide dès le démarrage. Il existe plusieurs types d'engrenage selon leurs fonctions tels que la souplesse, le changement de l'axe de rotations, génération du grand rapport de réduction, on peut citer quelques engrenages ci-dessus :

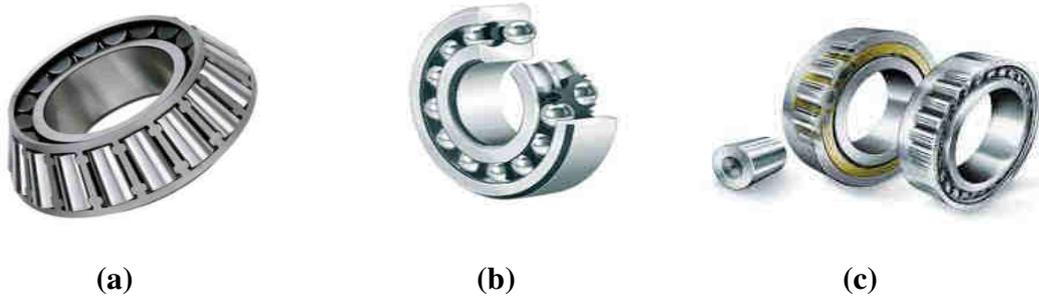


**Figure II.8 :** Les différents types d'engrenages, (a) : engrenages denture droit, (b) : engrenages à vis sans fin, (c) : engrenage conique

### II.2.2.2 Les Roulements:

Le roulement est un organe mécanique destiné à permettre la transmission des efforts entre deux pièces en rotation l'une par rapport à l'autre avec un frottement minimal.

Il existe plusieurs types de roulement, chaque forme des roulements possède un spécifique bénéfique, par exemple un type de roulement qui peut supporter une charge plus élevée en contact linéaire, ou d'autre roulement qui peut supporter une charge axiale élevée.



**Figure II.9 :** Les différents types des roulements, (a) : roulement à rouleaux conique, (b): roulement à bille à contact oblique, (c) : roulement à rouleaux conique

### II.2.2.3 Le différentiel :

Le différentiel est un ensemble d'engrenages coniques qui se trouve dans l'essieu arrière du véhicule, entre les deux roues motrices. Le différentiel est monté sur l'arbre de transmission et est relié aux deux arbres de roue par des demi-arbres. Lorsque le véhicule est en mouvement, le différentiel permet de répartir la puissance entre les deux roues motrices en fonction de la résistance de chacune. En virage, les roues extérieures et intérieures tournent à des vitesses différentes, ce qui peut entraîner une usure prématurée des pneus et une perte de traction. Le différentiel permet de compenser cet effet en permettant aux roues de tourner à des vitesses différentes. Les engrenages coniques du différentiel permettent de transférer la puissance de l'arbre de transmission aux deux demi-arbres de roue tout en compensant les écarts de vitesse de rotation.



**Figure II.10 :** Bloc mécanique réel d'un différentiel

#### II.2.2.4 Les cardans :

Les cardans, également appelés arbres de transmission, sont des éléments de la transmission mécanique qui permettent de transmettre la puissance et le mouvement entre deux axes non alignés. Les cardans sont couramment utilisés dans les véhicules.



**Figure II.11 :** Bloc réel du cardan d'un véhicule

Dans une transmission par propulsion, un cardan est utilisé pour transmettre la puissance du moteur à l'essieu arrière, tandis que dans une transmission intégrale, deux cardans sont utilisés pour transmettre la puissance du moteur aux quatre roues.

- D'une manière générale, la transmission désigne l'ensemble du système mécanique permettant de transmettre le couple et la puissance du moteur aux roues, Les figure suivante donne le schéma cinématique et le modèle du bloc réel d'un système de transmission d'un véhicule :



**Figure II.12 :** Bloc réel de transmission d'un véhicule électrique

Pour bien comprendre on va introduire le schéma cinématique suivant qui représente un système de transmission constituant par des éléments mécaniques défini précédemment :

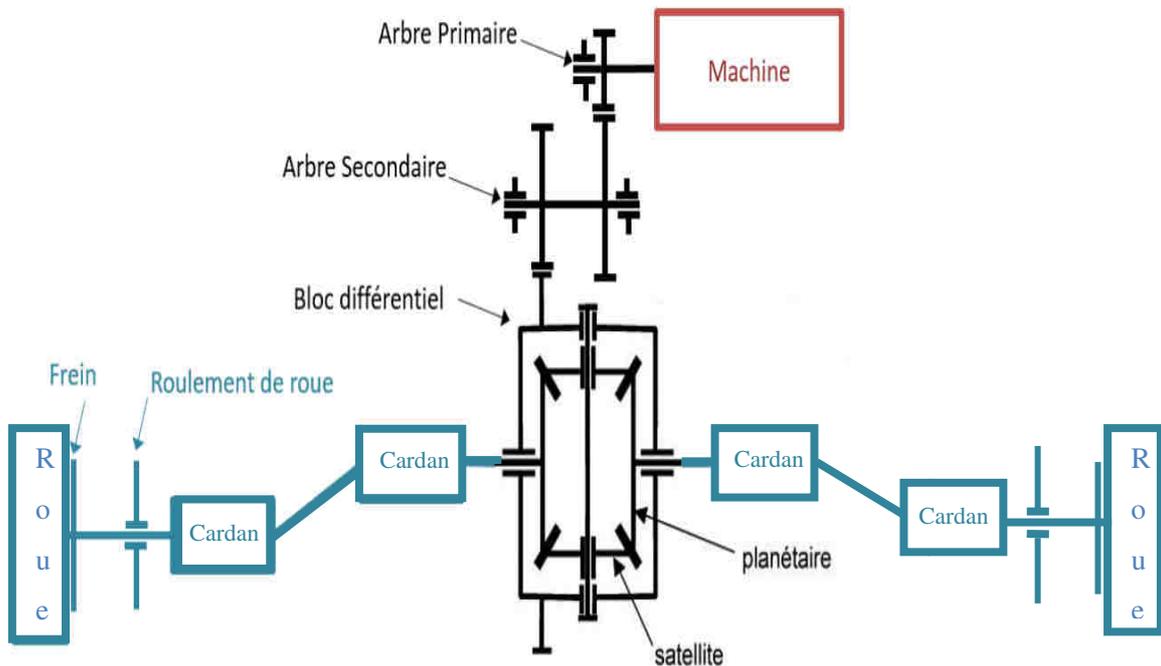


Figure II.13 : Schéma cinématique d'un système de transmission.

**Les équations de la vitesse et du couple :**

Les relations suivantes permettent de calculer la vitesse et le couple demandé à la machine :

$$\Omega_{mot} = \Omega_{trans} \cdot K_{AP/BD} \tag{II.11}$$

Avec :

$K_{AP/BD}$  : rapport de réduction entre arbre primaire et bloc différentiel.

$\Omega_{mot}$  : Vitesse de rotation de l'arbre moteur [rad / s]

$C_{trans}$  : Couple nécessaire au bloc différentiel [Nm].

Le couple et la puissance mécanique demandée au moteur sont calculés par un bilan de puissance en tenant compte des pertes dans la transmission (rendement de la transmission):

$$C_{mot} = \frac{C_{trans}}{K_{AS/BD}} \Rightarrow C_{mot} = \frac{\Omega_{trans}}{K_{AS/BD}} + \frac{q_{trans}}{\Omega_{mot}} \tag{II.12}$$

$$P_{mot} = C_{mot} \cdot \Omega_{mot} \tag{II.13}$$

- $q_{trans}$  : pertes dans la transmission [w]
- $P_{mot}$  : puissance mécanique demandée au moteur [w]
- $C_{mot}$  : Couple demande au moteur [Nm]
- $K_{AS/BD}$  : rapport de réduction entre arbre secondaire et bloc différentiel.

La figure suivante présente le schéma bloc du modèle de transmission avec ces entrées, ces sorties :

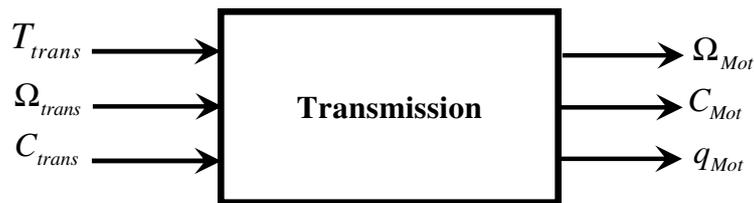
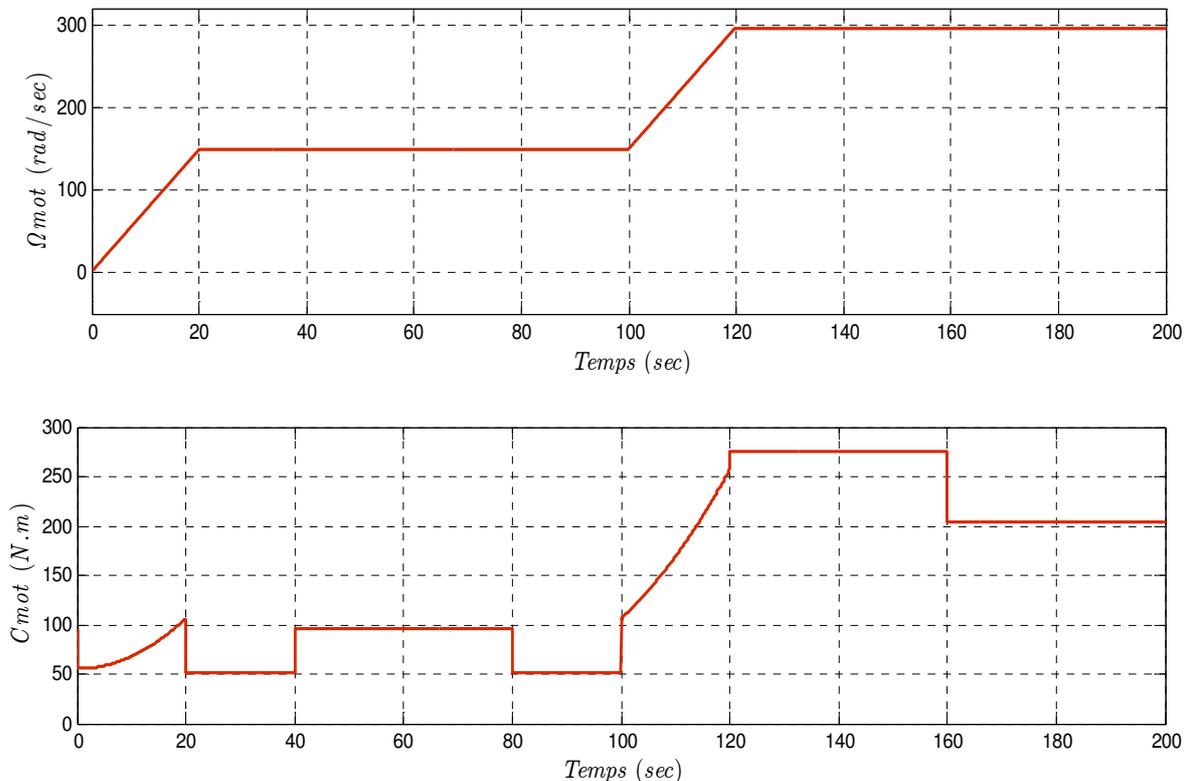


Figure II.14: Schéma bloc du modèle de transmission.

Encore une fois, si en tenant compte des conditions de roulage donnés par la figure II.4 et du couple et vitesse obtenues et représentés par la figure II.7 (les paramètres du système de transmission sont donnés par l'annexe 2), les résultats obtenues à la sortie du système de transmission sont les suivants :



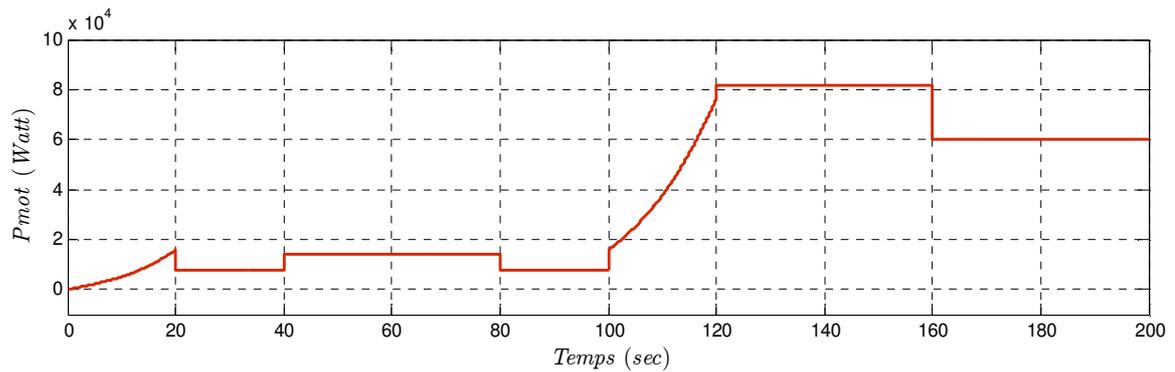


Figure II.15 : Couple, vitesse et puissance coté moteur.

### II.2.3 Machine électrique :

Les machines électrique sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique ou vice versa (Générateurs), elles sont largement utilisés dans plusieurs domaine de sorte que ces dernières année devient un élément crucial dans l'industrie.

Il existe différents types de machines électriques, chacune ayant des caractéristiques et des applications spécifiques. Voici une brève introduction sur les principales machines électriques :

Les machines à courant continu : Ils fonctionnent en convertissant l'énergie électrique en mouvement mécanique à l'aide d'un courant continu. Ils sont utilisés dans de nombreux appareils électriques et véhicules électriques.

Les machines à courant alternatif : Ils convertissent l'énergie électrique en mouvement mécanique à l'aide d'un courant alternatif. Les machines asynchrones et les machines synchrones sont les deux types principaux de moteurs à courant alternatif.

#### II.2.3.1 Généralités sur la machine synchrone :

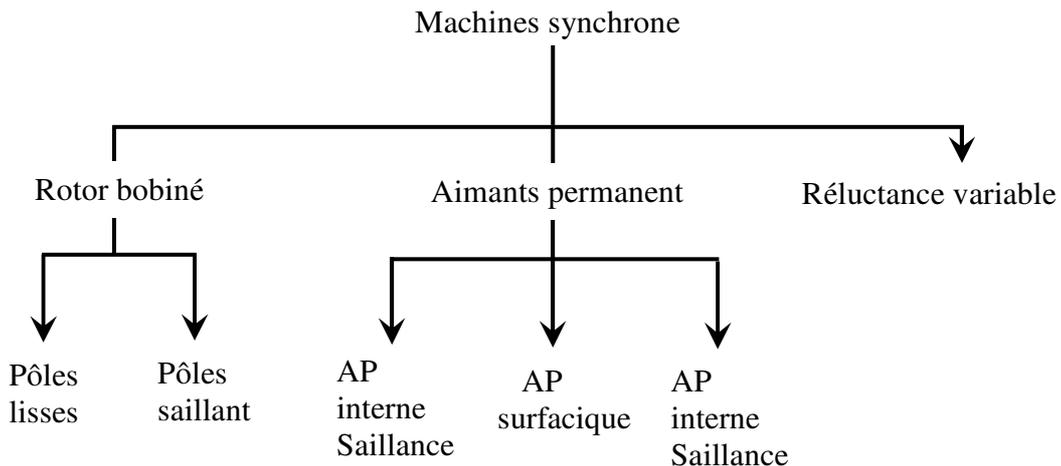
A la fin du XIXe siècle, l'inventeur serbe Nikola Tesla décrit le principe de fonctionnement des machines à courant alternatif. Aujourd'hui il existe plusieurs types de machine synchrone de même principe de fonctionnement. Le stator alimenté par une source triphasé, crée dans l'entrefer un champ tournant qui interagît avec le rotor, ce qui ne donne un couple au niveau de l'arbre de la machine.

Pour la machine synchrone il existe trois interactions entre le champ tournant et le rotor :

- interaction champ - aimant : c'est le cas des machines synchrones à aimants permanents

- interaction champ - courant : comme dans les machines asynchrones et les machines synchrones à rotor bobiné.
- interaction champ tournant - matériau ferromagnétique : il s'agit des machines à réluctance variable.

La figure 5.2, montre aussi les différents types de machine synchrone plus détaillé selon les types de rotor :



**Figure II.16 :** Les différents types des machines synchrone

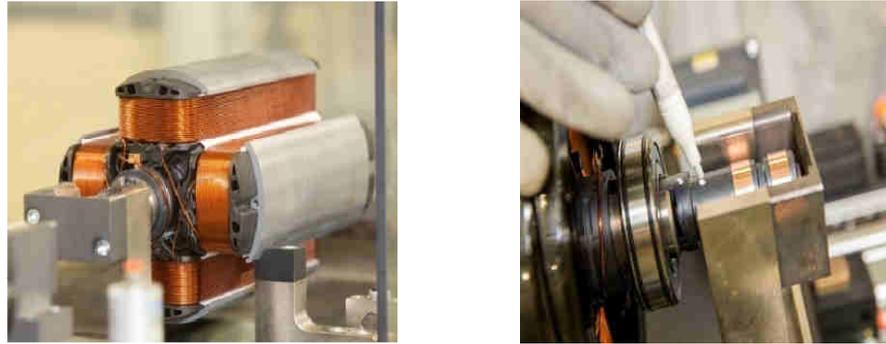
### II.2.3.2 Machine synchrone à rotor bobiné :

Dans notre étude on s'intéresse à la machine synchrone a rotor bobiné, spécifiquement à la machine synchrone à pôles saillant, pour cela on représentant son principe de fonctionnement et son modèle dynamique.

#### II.2.3.2.1 Principe, fonctionnement et modélisation :

La machine synchrone a rotor bobiné, est un type des machines électriques ou le rotor constitué d'un enroulement bobiné plutôt qu'un aimant permanent. Pour le fonctionnement de la machine, son principe est basé sur l'interaction entre le champ magnétique crée au bout du stator et les enroulements du rotor.

Le stator est alimenté par un courant alternatif triphasé fourni aux enroulements, créant un champ magnétique. Pour le rotor, ces enroulements sont connectés à une source de courant continu externe qui permet l'excitation du rotor.



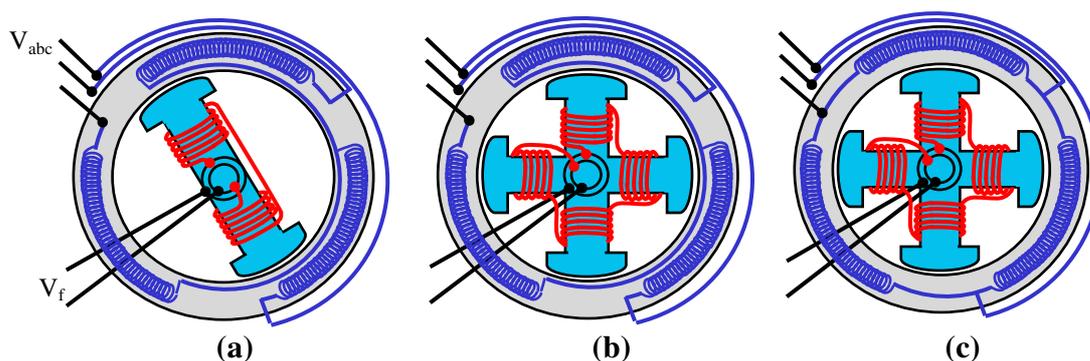
**Figure II.17 :** Bloc réel un rotor bobiné d'une machine synchrone.

On peut classer la machine a rotor bobiné selon le type du rotor aussi car il existe deux types les plus fameuse :

- Machine synchrone à pôles lisses : Le rotor d'une machine synchrone à pôles lisses est constitué d'une surface cylindrique lisse, et Le stator est composé d'un empilement de tôles avec des enroulements de bobines.
- Machine synchrone à pôles saillant : contrairement à la machine à pôles lisses, rotor est composé de pôles magnétiques saillants et distincts qui se trouvent sur sa surface.

### II.2.3.2.2 Mise en équations :

Sous les hypothèses classiques de modélisation des machines électriques en vue de leur commande, nous considérons une machine synchrone à rotor bobiné à  $2p$  pôles saillants.



**Figure II.18 :** (a) : Moteur synchrone à rotor bobiné à  $1p$  pôles saillant avec couplage en étoile, (b) : Moteur synchrone à rotor bobiné à  $2p$  pôles saillant avec enroulement à couplage étoile, (c) moteur a couplage triangle

Le moteur synchrone représenté par la figure (II. 23) se compose:

- D'un circuit statorique fixe comportant trois enroulements identiques décalés entre eux de 120°.
- un enroulement inducteur.

Nous commençons par la modélisation dans le repère abc triphasé, en passant jusqu'à le repère  $\alpha\beta$  par le passage du repère dq.

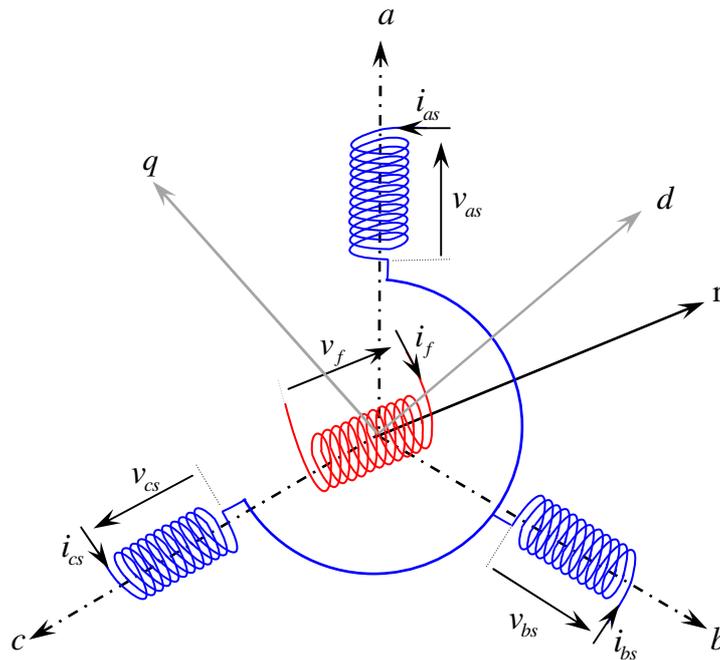


Figure II.19 : Représentation schématique du repère triphasé d'une MSR

**Equations magnétiques :**

Les flux de la machine s'écrivent comme suit :

$$\varphi_{as} = L_{ss}i_{as} + M_{sf}i_f \tag{II.14.a}$$

$$\varphi_{bs} = L_{ss}i_{bs} + M_{sf}i_f \tag{II.14.b}$$

$$\varphi_{cs} = L_{ss}i_{cs} + M_{sf}i_f \tag{II.14.c}$$

$$\varphi_f = L_f i_f + M_{sf} i_s^{abc} \tag{II.14.d}$$

Avec :

$$I_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T \tag{II.15}$$

La matrice inductance  $L_{ss}$  s'écrit sous la forme développée suivantes :

$$L_{ss} = L_{so} + L_{sv} \quad (\text{II.16})$$

$$L_{so} = \begin{bmatrix} L_{so} & M_{so} & M_{so} \\ M_{so} & L_{so} & M_{so} \\ M_{so} & M_{so} & L_{so} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$L_{sv} = l_{sv} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

En ce qui concerne  $M_{sf}$  qui est l'inductance mutuelle entre l'enroulement rotorique et les enroulements statoriques, elle a l'expression suivante :

$$M_{sf} = M_0 \begin{bmatrix} \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

### Equations électriques :

La loi des mailles, appliquée sur les phases statoriques et rotoriques, donne les équations Suivantes :

$$v_s^{abc} = R_s i_s^{abc} + \frac{d\varphi_s^{abc}}{dt} \quad (\text{II.20})$$

$$v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \quad (\text{II.20.a})$$

$$v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \quad (\text{II.20.b})$$

$$v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \quad (\text{II.20.c})$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \quad (\text{II.21})$$

### Couple électromagnétique :

$$C_m = \frac{3}{2} p \cdot (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II.22})$$

**II.2.3.2.3 Modélisation dans un repère diphasé :**

On peut écrire les équations de la machine synchrone dans un repère diphasé quelconque, On aura les équations de tensions suivantes :

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \Omega \varphi_q \tag{II.23.a}$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \Omega \varphi_d \tag{II.23.b}$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \tag{II.23.c}$$

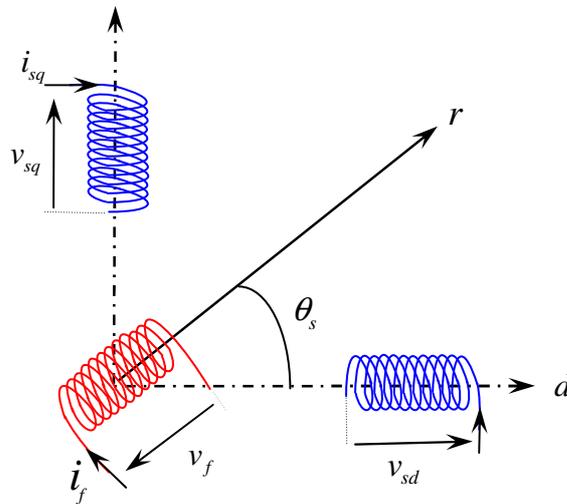
$$\varphi_d = L_d i_d + M_f i_f \tag{II.24.a}$$

$$\varphi_q = L_q i_q \tag{II.24.b}$$

$$\varphi_f = L_f i_f + M_f i_d \tag{II.24.c}$$

**II.2.3.2.4 Modélisation dans le repère du champ tournant**

Le modèle de la machine synchrone dans le repère du champ tournant dq est obtenu, à partir du modèle dans le repère fixe triphasé abc, par rotation d'angle  $\theta$ , angle du rotor par rapport au stator :



**Figure II.20 :** Représentation symbolique de la machine synchrone dans le repère  $dq$ .

On représente notre système dans un repère biphasé, pour cela on doit effectuer un transformation de Park inverse triphasé biphasé :

$$\chi_{dq} = P^{-1}(\theta) \chi_{abc} \tag{II.25}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} \mathcal{X}_d \\ \mathcal{X}_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{X}_a \\ \mathcal{X}_b \\ \mathcal{X}_c \end{bmatrix}$$

Maintenant on peut représenter les grandeurs de la machine dans le repère du champ tournant en utilisant la transformation représentant dans l'équation (II.33) :

**Equations magnétique :**

$$\varphi_{sd} = L_d i_{sd} + M_{fd} i_f \quad (\text{II.26.a})$$

$$\varphi_{sq} = L_q i_{sq} \quad (\text{II.26.b})$$

$$\varphi_f = L_f i_f + M_{fd} i_{sd} \quad (\text{II.26.c})$$

**Equations électriques :**

Les machines synchrones sont généralement étudiées dans le référentiel dq ( $\Omega = \Omega_r$ ) :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \Omega_r \varphi_{sq} \quad (\text{II.27.a})$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \Omega_r \varphi_{sd} \quad (\text{II.27.b})$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \quad (\text{II.27.c})$$

Avec :

$$\Omega = p \cdot \omega$$

On substitue dans les équations ci-dessus par les équations du flux (II.26), on obtient finalement les équations des tensions dans le repère dq :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} + M_{fd} \frac{di_f}{dt} - \Omega L_q i_{sq} \quad (\text{II.28.a})$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \Omega (L_d i_{sd} + M_f i_f) \quad (\text{II.28.b})$$

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fd} \frac{di_{sd}}{dt} \quad (\text{II.28.c})$$

Couple électromagnétique :

$$C_m = \frac{3}{2} p \cdot (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II.29})$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_m - C_r \quad (\text{II.30})$$

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{3P}{2J} \cdot \varphi_{sd} i_{sq} - \frac{3P}{2J} \cdot \varphi_{sq} i_{sd} - C_r \quad (\text{II.31})$$

### II.2.3.2.5 Représentation d'état dans le repère dq :

On prend les équations des tensions dans le repère dq spécifiquement l'équation (II.28.b), on aura :

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{1}{L_q} (L_d i_{sd} \Omega + M_f i_f + R_s i_{sq} - v_{sq}) \quad (\text{II.32})$$

Et aussi d'après les équations (II.28.a), on aura :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{1}{L_d} \left( R_s i_{sd} + M_f \frac{di_f}{dt} - L_q i_{sq} \Omega \right) + \frac{1}{L_d} v_{sd} \quad (\text{II.33})$$

On pose l'équation (II.32) dans (II.28.c):

$$\begin{aligned} v_f &= R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} - \frac{M_{fd}}{L_d} \left( R_s i_{sd} + M_f \frac{di_f}{dt} - \Omega L_q i_{sq} \right) + \frac{M_{fd}}{L_d} v_{sd} \\ &= R_f i_f + \left( L_f - K_d M_{fd} \right) \frac{di_f}{dt} - K_d R_s i_{sd} + K_d L_q \Omega i_{sq} + K_d v_{sd} \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$K_d = \frac{M_{fd}}{L_d}$$

$$K_f = \frac{M_{fd}}{L_f}$$

$$\frac{1}{\delta L_f} = \frac{1}{(1 - K_d K_f) L_f} = \frac{1}{L_f - L_f K_d K_f} = \frac{1}{L_f - \frac{M_{fd}^2}{L_d}}$$

Et donc pour le courant  $i_f$  :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{\delta L_f} (K_d R_s i_{sd} - K_d L_q i_{sq} \Omega - K_d v_{sd} - R_f i_f + v_f) \quad (\text{II.35})$$

On substitue dans l'équation (II.35) dans (II.28.a) :

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{M_{fd}}{\delta L_f} (K_d R_s i_{sd} - K_d L_q i_{sq} \Omega - K_d v_{sd} - R_f i_f + v_f) - \Omega L_q i_{sq} \\
 &= \left( R_s + \frac{M_{fd}}{\delta L_f} K_d R_s \right) i_{sd} - \Omega L_q \left( \frac{M_{fd}}{\delta L_f} K_d i_{sq} + i_{sq} \right) + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{M_{fd}}{\delta L_f} (K_d v_{sd} + R_f i_f - v_f)
 \end{aligned} \tag{II.36}$$

Avec :

$$\frac{di_{sq}}{dt} = R_s \left( 1 + \frac{M_{fd}}{\delta L_f} K_d \right) i_{sd} \tag{II.37}$$

Alors :

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{M_{fd}}{L_f} \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{R_f}{L_f} i_f + \frac{1}{L_f} v_f \tag{II.38}$$

Remplaçons l'équation ci-(II.38) dans (II.28.a) :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{M_{fd} M_{fd}}{L_f} \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{M_{fd} R_f}{L_f} i_f + \frac{M_{fd}}{L_f} v_f - L_q i_{sq} \Omega \\
 &= R_s i_{sd} + \left( L_d - M_{fd} K_f \right) \frac{di_{sd}}{dt} - K_f R_f i_f + K_f v_f - L_q i_{sq} \Omega \\
 &= R_s i_{sd} + L_d \delta \frac{di_{sd}}{dt} - K_f R_f i_f + K_f v_f - L_q i_{sq} \Omega
 \end{aligned} \tag{II.39}$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\delta L_d} \left( -R_s i_{sd} + L_q i_{sq} \Omega + K_f R_f i_f - K_f v_f + v_{sd} \right) \tag{II.40}$$

Finalement on obtient les cinq équations :

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{1}{L_q} \left( L_d i_{sd} \omega + M_f i_f + R_s i_{sq} - v_{sq} \right) \tag{II.41.a}$$

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\delta L_d} \left( -R_s i_{sd} + L_q i_{sq} \Omega + K_f R_f i_f - K_f v_f + v_{sd} \right) \tag{II.42.b}$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{\delta L_f} \left( K_d R_s i_{sd} - K_d L_q i_{sq} \Omega - K_d v_{sd} - R_f i_f + v_f \right) \tag{II.43.c}$$

Et les équations mécaniques se résume par l'expression d couple électromagnétique et l'équation de la vitesse, comme suit :

$$C_m = \frac{3}{2} p \cdot (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II.44})$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_m - C_r \quad (\text{II.45})$$

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{3P}{2J} \cdot \varphi_{sd} i_{sq} - \frac{3P}{2J} \cdot \varphi_{sq} i_{sd} - C_r \quad (\text{II.46})$$

Les machines électriques utilisées dans les chaînes de traction pour les véhicules électriques sont des machines de grandes puissances. Pour le véhicule dont nous avons utilisé, la puissance du moteur électrique est de 80KW. Les paramètres de la machine utilisée dans cette partie de travail sont donnés dans l'Annexe. Les résultats de simulation du fonctionnement sont donnés par les deux figures suivantes :

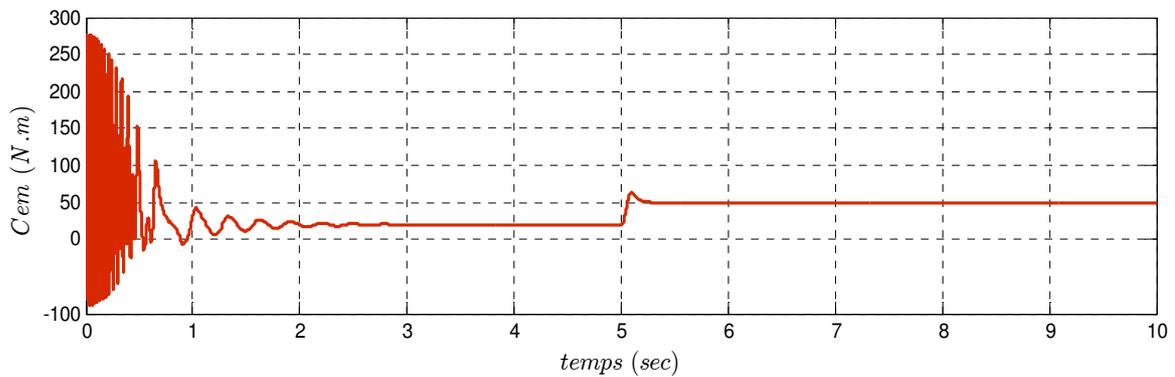


Figure II.21: Couple électromagnétique du moteur

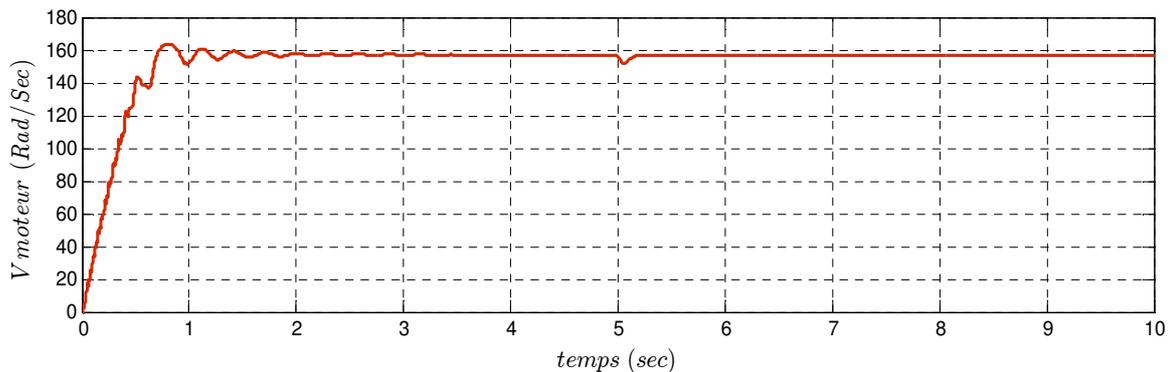


Figure II.22: Vitesse du moteur en Rad/S

On peut aussi simuler d'autres paramètres tels que le courant Id et Iq :

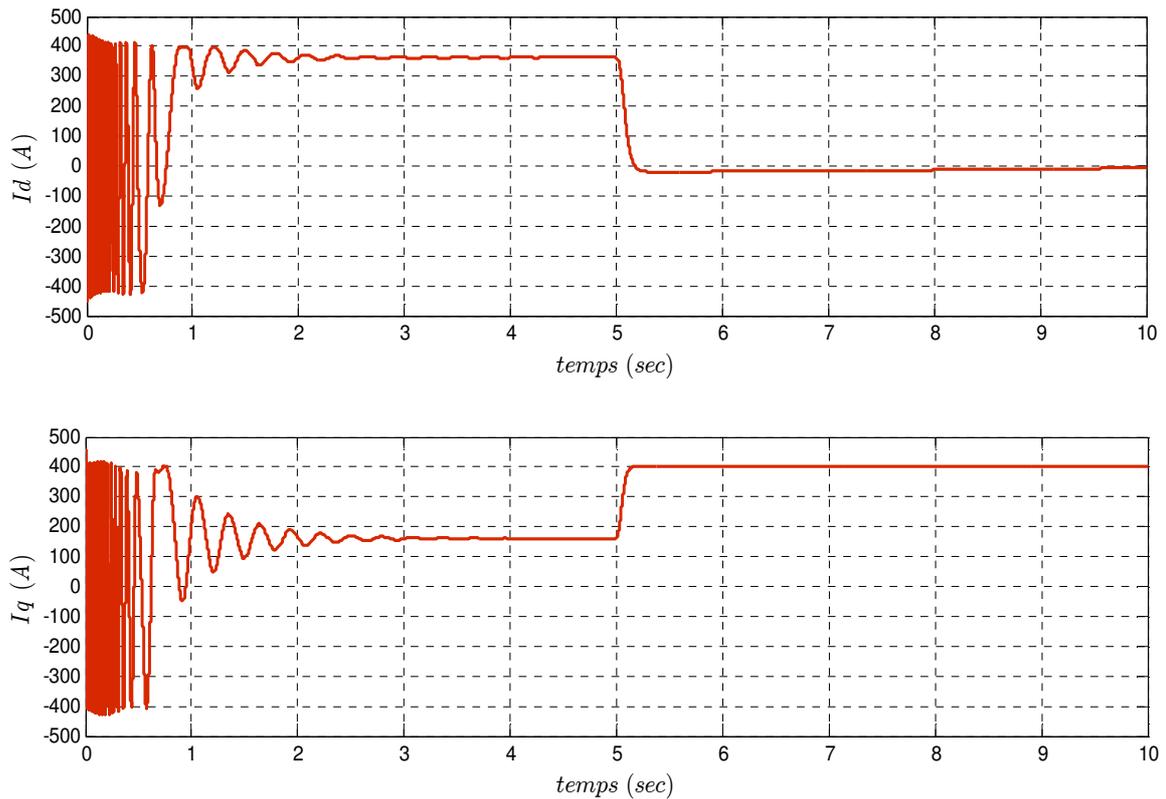


Figure II.23: Courant  $I_d$  et  $I_q$  du moteur MSRB

II.2.4 Electronique de puissance :

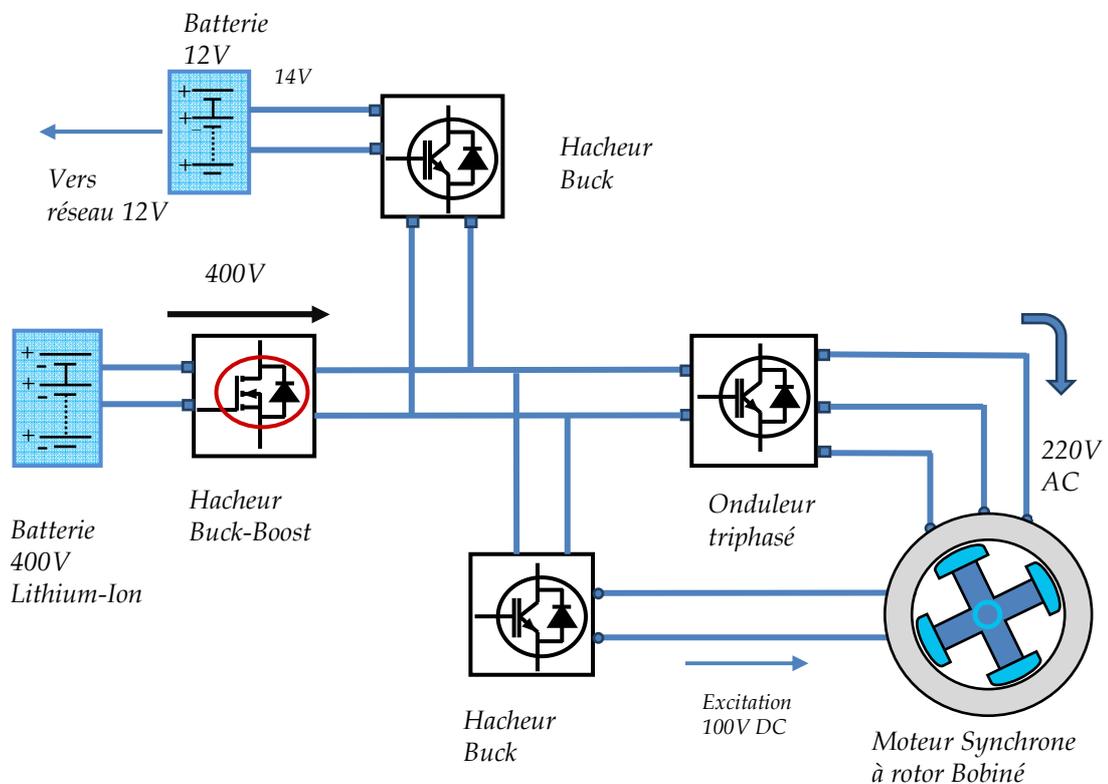


Figure II.24: Schéma de puissance d'un véhicule électrique.

L'électronique de puissance joue un rôle crucial dans le fonctionnement d'un véhicule électrique. Ils sont responsables de plusieurs tâches tel que la conversion de l'énergie électrique, d'une tension plus haute au plus bas, ou même de conversion de la source d'énergie alternative en continu, ou d'autres fonctionnements. Dans notre cas on va voir le principe et les éléments d'électronique de puissance donnés sur le schéma de la figure II.24.

#### **II.2.4.1 Les Hacheurs :**

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension d'une valeur continue et variable à partir d'une tension ou source de tension à son entrée d'une valeur continue et fixe. Ils jouent le même rôle que les transformateurs en courant continu.

Il existe plusieurs hacheurs des différentes configurations, nous avons intéressé par trois hacheurs principaux :

##### **A. Hacheur Abaisseur (Buck ou série) :**

Le hacheur Buck est un type de convertisseur DC-DC utilisé pour abaisser une tension à son entrée à une tension de sortie inférieure à celle de l'entrée en utilisant des techniques de commutation de l'alimentation électrique. Il est couramment utilisé dans les circuits électroniques pour sa haute efficacité énergétique et sa régulation précise de la tension de sortie.

##### **B. Hacheur élévateur ( Boost ou parallèle ) :**

Ce hacheur est appelé hacheur parallèle, car le semi-conducteur à fermeture et ouverture commandées est dérivé aux bornes de l'entrée. Il est appelé également hacheur survolteur, puisque la tension de sortie  $V_s$  est toujours plus grande que la tension moyenne d'entrée, il est également appelé élévateur (sous-entendu, de tension) [21].

##### **C. Hacheur Abaisseur-élévateur (Buck-Boost) :**

Dernier convertisseur de la famille des convertisseurs DC/DC, le convertisseur Buck-Boost est également appelé abaisseur élévateur par son aptitude à fournir une tension plus faible, ou plus élevée que celle appliquée en son entrée. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique.

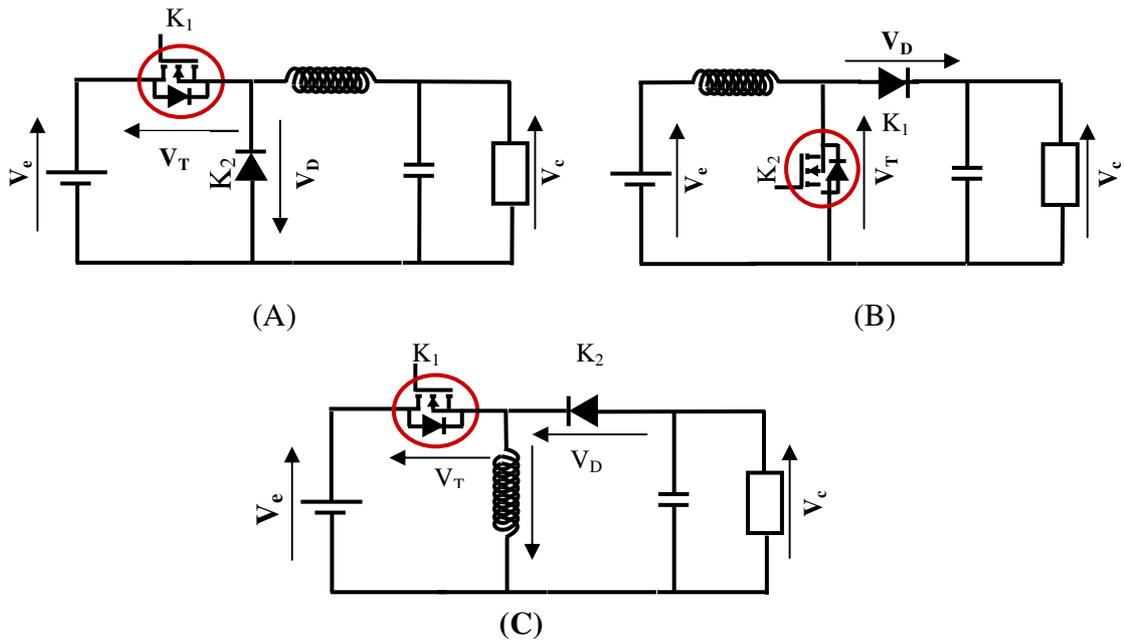


Figure II.25: (A) Hacheur Buck, (B) Hacheur Boost, (C) Hacheur Buck-Boost

II.2.4.1.1 Principe, fonctionnement et modélisation :

Puisque le véhicule électrique à besoin d'une alimentation pour bien fonctionner, on distingue qu'on a besoin de trois hacheur (deux de même type) pour assurer la conversion :

A. Modèle mathématique d'un hacheur Buck :

Dans notre étude, on va utiliser deux hacheur Buck, le premier est destiner pour l'excitation du moteur synchrone à rotor bobiné, c.-à-d, il va recevoir une tension constante de quatre cent volt et ça va être transformé en cent volt. Pour le deuxième hacheur il est destiner au chargement de batterie douze volt, d'où il reçoit une tension de quatre cent Volt ou elle va passer par un transformateur DC-DC à isolation galvanique qui transforme cette tension vers quatre-vingt Volt. Il va prend cette tension pour la convertir en quatorze Volt.

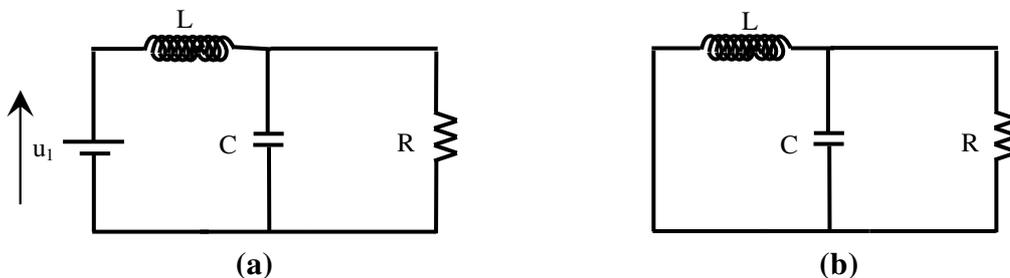


Figure II.26 : (a) Hacheur Buck en état « On », (b) Hacheur Buck en état « Off ».

Les variables d'état du convertisseur Buck sont  $V_C$  et  $I_L$ . Pendant l'état « ON »,  $V_C$  et  $I_L$  peuvent être définis ci-dessous:

$$v_c = u_1 - L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.47})$$

$$i_L = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (\text{II.48})$$

Ici pour le changement de variable on va définir la représentation d'états suivant:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

En mappant les variables d'état  $I_L = x_1$  et  $V_c = x_2$ . Ses dérivées  $\dot{x}_1$  et  $\dot{x}_2$  dans (II.49) et (II.50) peuvent être obtenues en réarrangeant (II.47) et (II.48). La matrice de la représentation d'état A et B dans (II.51) pour le convertisseur Buck à l'état « ON » peut être formulée à l'aide de (II.49) et (II.50) ci-dessous:

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{L}x_2 + \frac{1}{L}u_1 \quad (\text{II.49})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad (\text{II.50})$$

Sous la forme d'une représentation d'état :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (\text{II.51})$$

Pendant l'état « OFF », où  $u_1$  est zéro et sa dérivée  $\dot{x}_1$  est indiquée dans (II.52) et la dérivée  $\dot{x}_2$  est identique à (II.50). De même, la matrice d'espace d'état A et B dans (II.53) pour le convertisseur Buck à l'état « OFF » peut être formulée à l'aide de (II.52) et (II.50):

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{L}x_2 \quad (\text{II.52})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (\text{II.53})$$

Après avoir dérivé les matrices A et B de l'espace d'états du convertisseur abaisseur pour ses états « ON » et « OFF ». Il est nécessaire de trouver sa matrice moyenne A et B avec le

compte du rapport cyclique  $d$ . Les matrices moyennes  $A$  et  $B$  sont représentées (II.54) et (II.55) respectivement:

$$\bar{A} = A_{(on)}d + A_{(off)}(1-d)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} (1-d) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (II.54)$$

$$\bar{B} = B_{(on)}d + B_{(off)}(1-d)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1-d) = \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.55)$$

Pour compléter le modèle du convertisseur Buck, la matrice moyenne de (II.54) et (II.55) est remplacée par une matrice illustré en (II.56):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (II.56)$$

Enfin, pour obtenir l'état de sortie de  $V_C$  et  $I_L$ , la représentation d'état pour les matrices  $C$  et  $D$  est illustré dans (II.57):

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (II.57)$$

On peut simuler en boucle ouverte le hacheur Buck en appliquant les paramètres qu'on a dimensionné (voire l'annexe), on obtient :

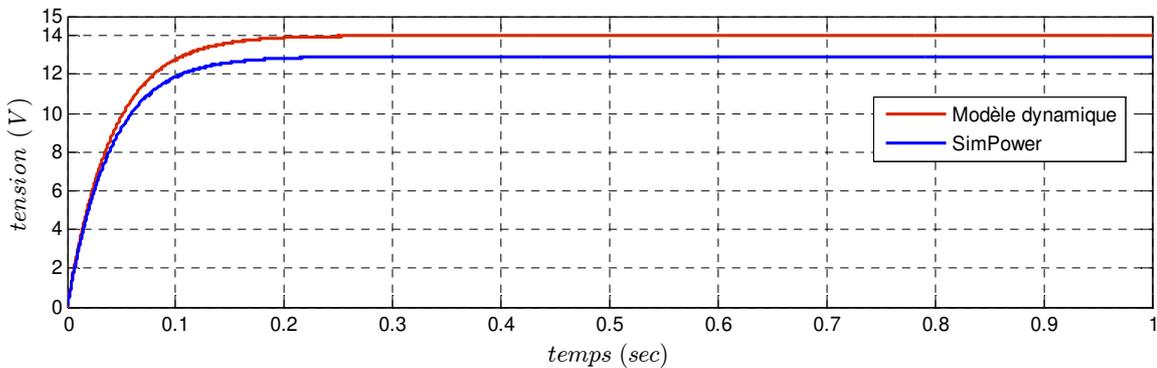
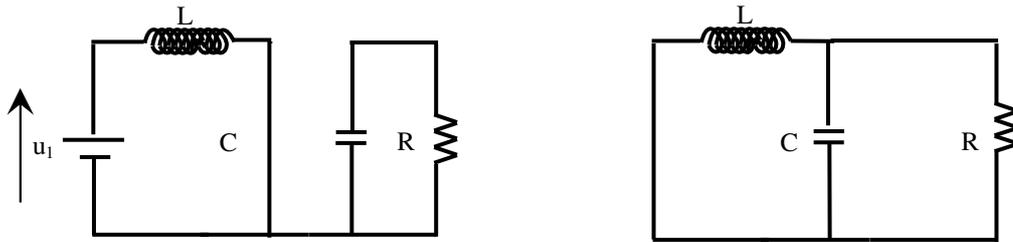


Figure II.27 : Simulation Hacheur Buck en boucle ouverte.

### B. Modèle mathématique d'un hacheur Buck-Boost :

Premièrement un hacheur Buck-Boost qui permet de transformer une alimentation de quatre cent volt qui n'est pas stable c.-à-d. la batterie peut nous donner une tension plus ou moins que cette valeur, et donc pour assurer le bon fonctionnement on utilise ce hacheur pour obtenir une tension de quatre cent volt stable.



**Figure II.28 :** Hacheur Buck-Boost pendant l'état « On » à gauche, et pendant l'état « Off » à Droite.

Pendant l'état « ON », l'inductance est chargée via  $u_1$  défini en (II.58). Il n'y a pas de flux de courant vers le condensateur et résistance dans cet état, où  $i_l$  est nul tel que défini en (II.59).

$$u_1 = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.58})$$

$$0 = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (\text{II.59})$$

Après une représentation d'état  $x_1$  et  $x_2$  des équations (II.58) et (II.59), On obtient la matrice (II.62) qui représente le modèle du Buck boost dans l'état « On »:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L} u_1 \quad (\text{II.60})$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{RC} x_2 \quad (\text{II.61})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (\text{II.62})$$

Pendant l'état « Off », il est similaire au convertisseur Buck dans l'état « OFF » où  $u_1$  est égal à zéro, mais ses états de sortie  $V_C$  et  $I_L$  sont de polarité inversée en raison de la décharge de l'inductance, comme indiqué dans (II.63) et (II.64) respectivement.

$$V_C = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.63})$$

$$I_L = -C \frac{dV_C}{dt} - \frac{V_C}{R} \quad (\text{II.64})$$

Encore une fois en mappant les variables d'état  $V_C = x_1$  et  $I_L = x_2$ . C'est les dérivées  $\dot{x}_1$  et  $\dot{x}_2$  dans (II.65) et (II.66) peuvent être obtenus par la substitution de (II.63) et (II.64).

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L} x_2 \quad (\text{II.65})$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{L} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \quad (\text{II.66})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (\text{II.67})$$

La moyenne des matrices A et B de la représentation d'états du convertisseur Buck-Boost pour ses états « ON » et « OFF » peut être formulée en tenant compte du rapport cyclique  $d$ . Les matrices moyennes A et B sont représentées (II.68) et (II.69) respectivement.

$$\bar{A} = A_{(on)} d + A_{(off)} (1-d)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} (1-d) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-d}{L} \\ -\frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.68})$$

$$\bar{B} = B_{(on)} d + B_{(off)} (1-d)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1-d) = \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.69})$$

Pour compléter le modèle de convertisseur Buck-Boost, la matrice moyenne de (II.68) et (II.69) est remplacée par une matrice illustré en (II.70):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-d}{L} \\ -\frac{1-d}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (\text{II.70})$$

Enfin, pour obtenir l'état de sortie de  $V_C$  et  $I_L$ , la représentation d'état pour les matrices C et D est illustré dans (II.71) :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (\text{II.71})$$

Encore une fois on va simuler l'Hacheur Buck boost en boucle ouverte en utilisant le dimensionnement des paramètres. On Prend la conversion d'abaissement :

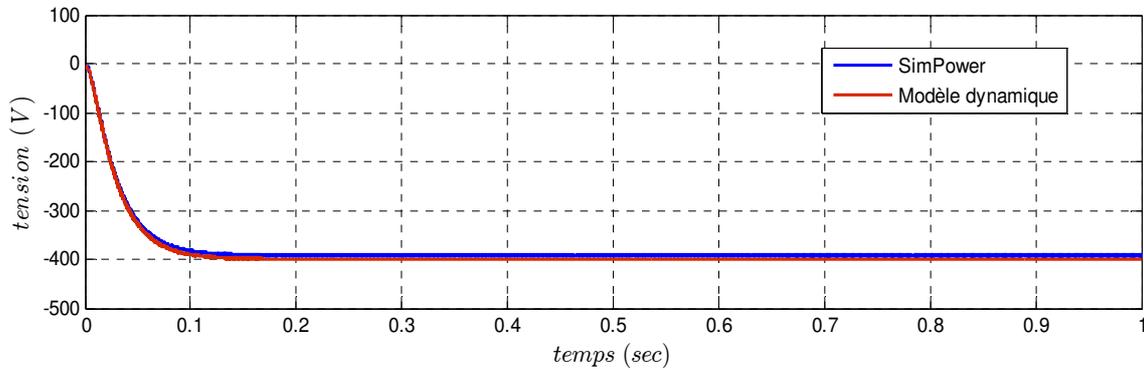


Figure II.29 : Simulation Hacheur Buck boost en boucle ouverte.

### II.2.4.2 Les onduleurs:

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment l'énergie électrique d'une forme continue en énergie alternative, à une valeur désirée de tension, de courant ou de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur à une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée. Il existe plusieurs types d'onduleur tels que l'onduleur en pont complet qui se compose de quatre interrupteurs, l'onduleur en demi-pont qui se compose de deux interrupteurs et l'onduleur triphasé à deux niveaux qui nous intéresse. L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs. Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

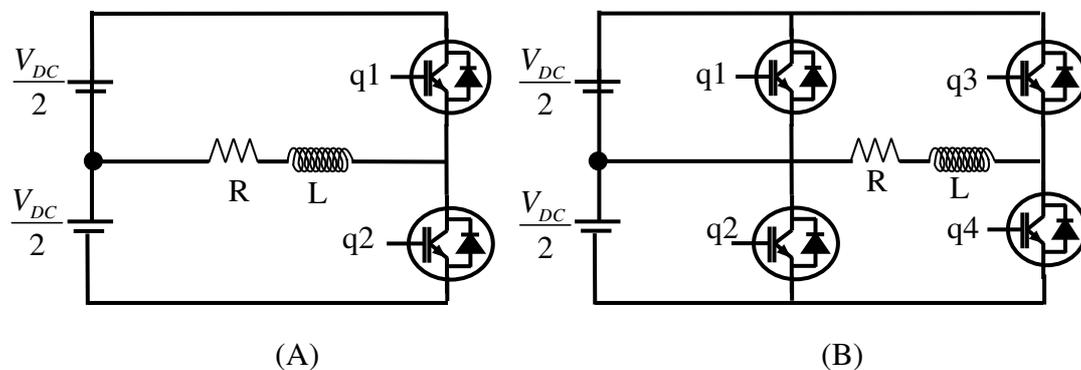


Figure II.30 : (A) Onduleur en demi-pont, (B) Onduleur en pont complet.

II.2.4.2.1 Principe, fonctionnement et Modélisation :

Pour assure la bonne configuration de la partie puissance on utilise un onduleur triphasé à deux niveaux qui permet de convertir une tension continue de quatre cent volt a une tension alternatif d'environ les deux-cents volts.

A. Modèle mathématique d'un onduleur triphasé:

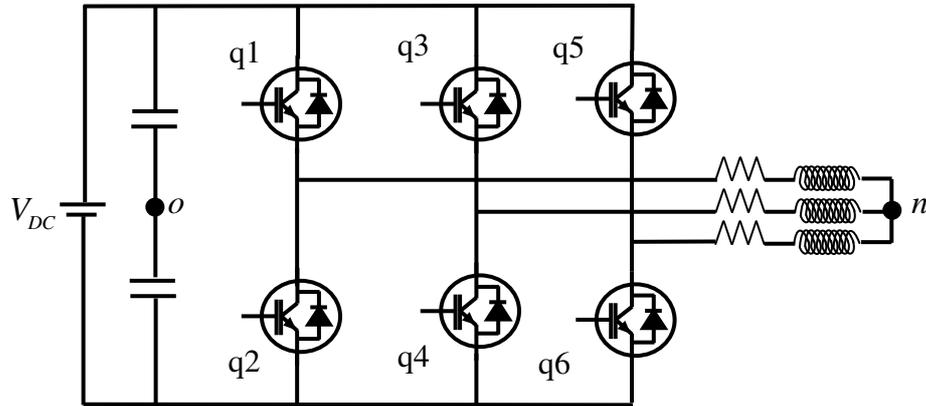


Figure II.31: Schéma d'un onduleur triphasé.

Il est composé de trois bras – trois phases-, chacun composé de deux interrupteurs commandés d'une façon complémentaire, pour éviter le court-circuit de la source  $V_{dc}$ . Les tensions entre phases :

D'un coté:

$$\begin{aligned} v_{ab} &= v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bc} &= v_{bo} - v_{co} \\ v_{ca} &= v_{co} - v_{ao} \end{aligned} \tag{II.72}$$

D'autre coté:

$$\begin{aligned} v_{ab} &= v_{an} - v_{bn} \\ v_{bc} &= v_{bn} - v_{cn} \\ v_{ca} &= v_{cn} - v_{an} \end{aligned} \tag{II.73}$$

La charge est à neutre isolé:

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \tag{II.74}$$

On déduit alors :

$$\begin{aligned} v_{an} &= \frac{1}{3}(2v_{ao} - v_{bo} - v_{co}) \\ v_{bn} &= \frac{1}{3}(2v_{bo} - v_{ao} - v_{co}) \\ v_{cn} &= \frac{1}{3}(2v_{co} - v_{ao} - v_{bo}) \end{aligned} \tag{II.75}$$

On déduit aussi la relation entre la tension du neutre de la charge et le point milieu de la source :

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \tag{II.76}$$

Finalement pour la démonstration en utilisant la commande en pleine onde 180 degrés (MLI voir Chapitre III) :

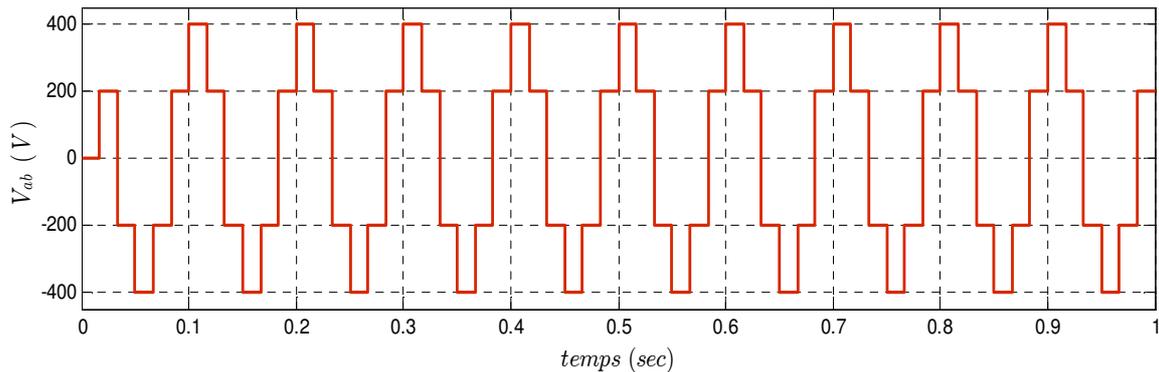


Figure II.32: Tension composée entre phase et phase.

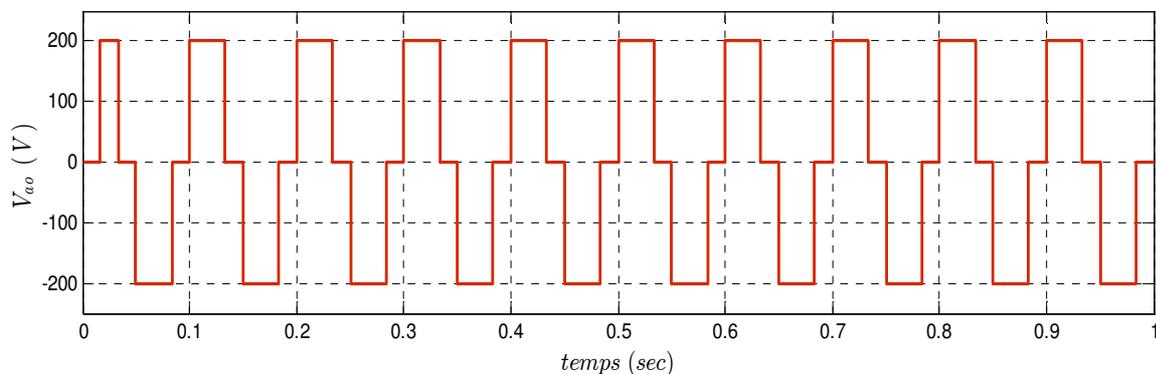


Figure II.33: Tension simple entre phase et neutre.

**II.2.5 Filtre LC :**

Il est nécessaire de filtrer les ondulations de courant en amont de la batterie afin de la protéger lorsque des convertisseurs (onduleurs, hacheurs) sont connectés à la batterie. Cela nécessite d'introduire une capacité parallèle bien dimensionnée entre la batterie et le convertisseur.

Nous modéliserons dans notre schéma un filtre LC (Figure 2.15) afin de prendre en compte l'inductance de ligne qui existe entre batterie et convertisseur(s).

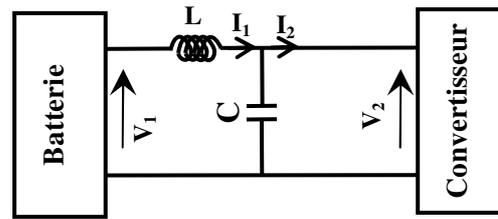


Figure II.34: Schéma bloc du filtre LC

L'inductance  $L$  modélise l'inductance de ligne entre la batterie et le convertisseur, tandis que la capacité  $C$  est un composant physique ajouté en parallèle de la batterie et dimensionné de telle sorte que les fréquences parasites soient filtrées.

Dans le domaine temporel, le comportement du filtre est représenté par les équations suivantes :

$$C \frac{dV_2(t)}{dt} = I_1(t) - I_2(t) \quad (\text{II.77.a})$$

$$L \frac{dI_1(t)}{dt} = V_1(t) - V_2(t) \quad (\text{II.77.b})$$

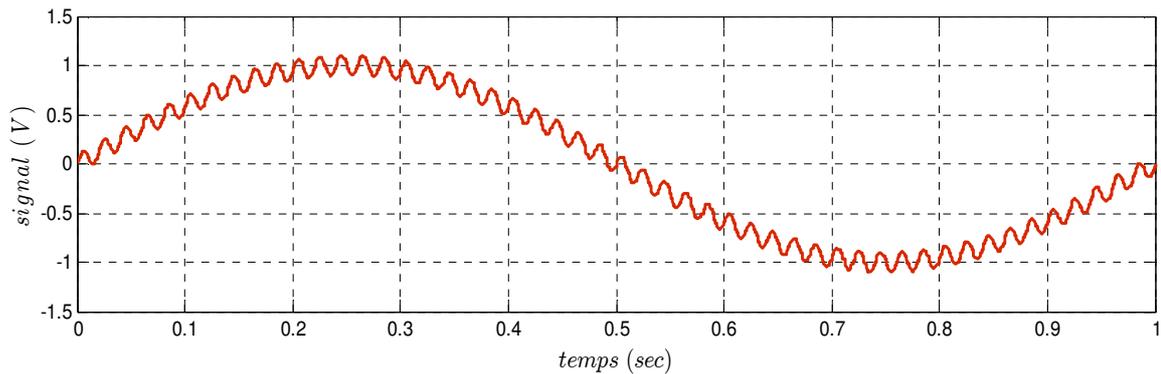
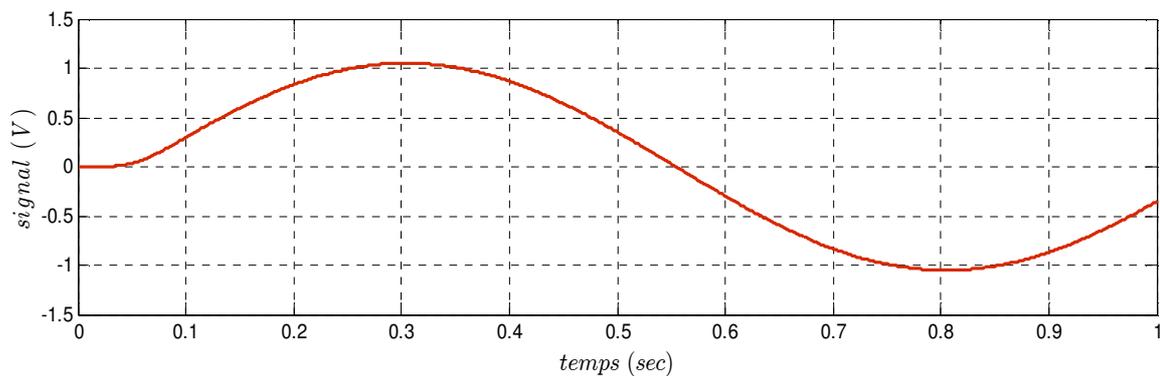
Avec la condition initiale :  $V_2(t_0)$ ,  $I_1(t_0)$

On prend  $V_2 = x_1$  et  $I_1 = x_2$  avec :  $u_1 = I_2$  et  $V_1 = u_2$

Sous forme matricielle, ces équations deviennent :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.78})$$

Pour bien comprendre comment le filtre LC se fonctionne on doit générer un signal perturber, et puis on va appliquer le filtre pour qu'on obtient un signal sans perturbation, la figure ci-dessous montre le fonctionnement du filtrage de type LC :

**Figure II.35 :** signal sinusoïdale perturbé**Figure II.36 :** Signal sinusoïdale filtré

## II.2.6 La Batterie de traction

La batterie est un réservoir d'énergie électrique qui se compose de plusieurs éléments formés chacun d'une anode, d'une cathode, d'un séparateur convenable pour isoler électriquement les électrodes à l'intérieur, d'un électrolyte et d'un récipient. On distingue plusieurs types de batteries, mais pour les véhicules électriques actuels on utilise fréquemment, les batteries Lithium-ion, Plomb-Acide, Nickel Cadmium et Nickel-Métal-Hydrure [10].

### II.2.6.1 Les différents types de batteries

Il existe plusieurs types de batteries dans le marché. Pour les véhicules électriques, les constructeurs s'orientent généralement vers le lithium-ion par contre Toyota jusqu'à maintenant ils ont utilisés des batteries nickel-métal-hydrure, voici donc les différents types de batterie fréquentées dans le domaine des véhicules électrique :

### II.2.6.1.1 La batterie Plomb Acide

Inventée en 1859 par Gaston planté, est à la fois la batterie la plus ancienne et la plus utilisée des accumulateurs électrochimiques [22]. Sa tension par élément est de 2V. Sa version pour automobile, beaucoup plus récente (1970-1975) [23]. Aujourd'hui, la batterie au plomb est la technologie la plus répandue dans les applications automobiles car elle est la plus mature, la moins onéreuse et la plus facile à recycler [24]. Cependant, cette technologie présente une énergie massique faible, elle est polluante et son recyclage n'est pas rentable. Elle tend donc à disparaître compte tenu des contraintes environnementales de plus en plus drastiques [25].

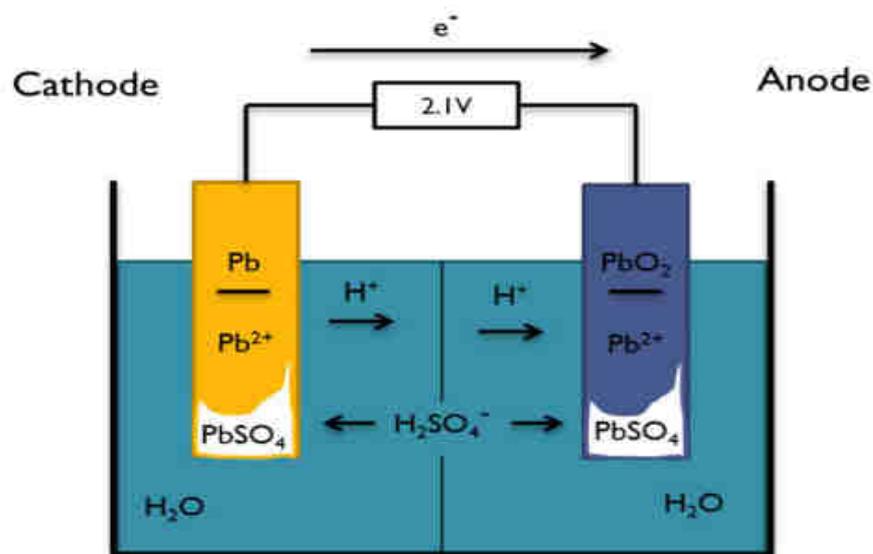


Figure II.37: Schéma réaction chimique du Batterie Plomb acide [28].

### II.2.6.1.2 Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) :

Inventée en 1904, cette batterie est la plus performante des batteries électrochimiques et la plus largement commercialisée. Sa tension par élément est de 1.2 V. La France est la plus grosse consommatrice de batteries Nickel-Cadmium au monde pour ses véhicules électriques du groupe PSA-Renault [24]. Réputées performantes et fiables, les batteries Ni-Cd souffrent cependant d'un effet mémoire et cette technologie est très polluante à cause de sa composante Cadmium [23].

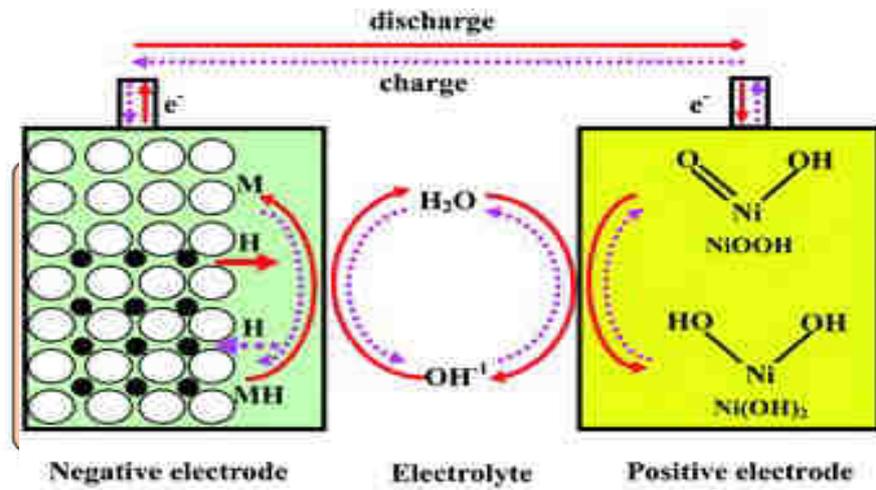


Figure II.38: Schéma réaction chimique du Batterie Nickel-Cadmium [27].

### II.2.6.1.3 Les batteries Nickel-hydrure-Métallique

Les batteries Ni-MH ont été inventées dans les années 1970, principalement motivées par la recherche sur le stockage de l'hydrogène dans les alliages métalliques. Les premières Ni-MH batteries étaient disponibles sur le marché en 1989 en tant que variante des cellules Ni-Cd et leur développement est associé au nom de l'inventeur Masahiko Oshitanide de la Yuasa Battery Company. La cathode d'une batterie Ni-MH est identique à celle d'une batterie Ni-Cd, tandis que l'anode est un composé d'alliages exprimés comme  $AB_5$  où A est composé d'un alliage de terres rares: La, Ce, Nd, et Pr tandis que B est un alliage de Ni, Co, Mn et  $A_1$ . Ainsi, l'électrode MH représente l'alliage hydrure capable d'absorber de manière réversible l'hydrogène pendant la charge et de pousser l'hydrogène dans l'électrolyte pendant la décharge [22].

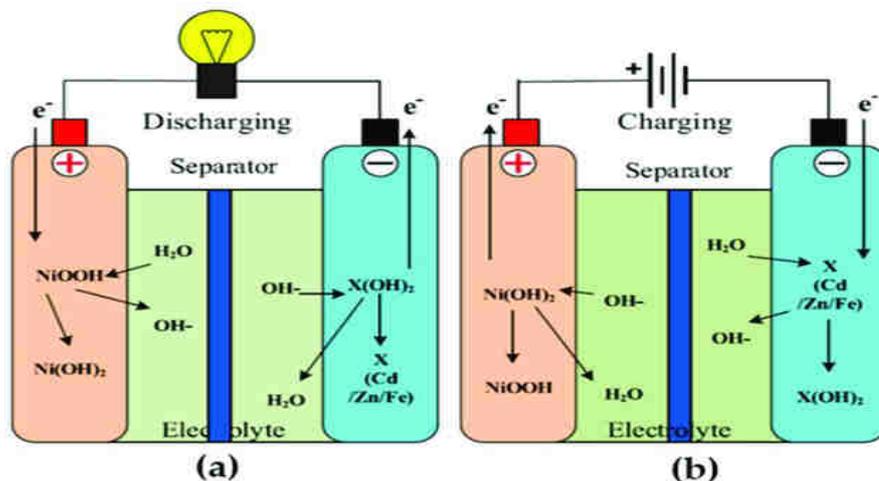


Figure II.39: Schéma réaction chimique du Batterie Nickel-Hydrure-Métallique [26].

#### II.2.6.1.4 Les batteries Lithium-Ion

Actuellement les batteries qui appartiennent à la famille Lithium sont parmi les solutions les plus répandues pour alimenter en électricité de nombreux produits de consommation disponibles sur le marché [13]. Elles possèdent de très fortes densités énergétiques et une importante énergie massique, ce qui favorise leur utilisation dans le secteur du transport et particulièrement pour les véhicules électriques qui nécessitent des batteries à grande capacité. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux systèmes de stockage à base de batteries Li-ion

#### II.2.6.2 Principe de fonctionnement :

Dans l'accumulateur Li-ion, le lithium est inséré sous forme d'ions ( $\text{Li}^+$ ) dans la structure cristalline, généralement en graphite, de l'électrode négative. C'est ce procédé d'insertion qui différencie la batterie Li-ion de la batterie lithium. Pendant la décharge d'une batterie Li-ion la (figure 1.11), le lithium est relâché du graphite, migre à travers l'électrolyte pour se loger dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive. A la charge, les ions  $\text{Li}^+$  viennent se replacer dans la structure en graphite [23]. Ce principe de fonctionnement est le même pour tous les types de batteries Li-ion. En revanche, la composition chimique des électrodes et de l'électrolyte varie d'une technologie à l'autre. Ces différences ont un impact sur ce qui fixe leurs caractéristiques en termes d'énergie, puissance, spécifiques ainsi que durée de vie.

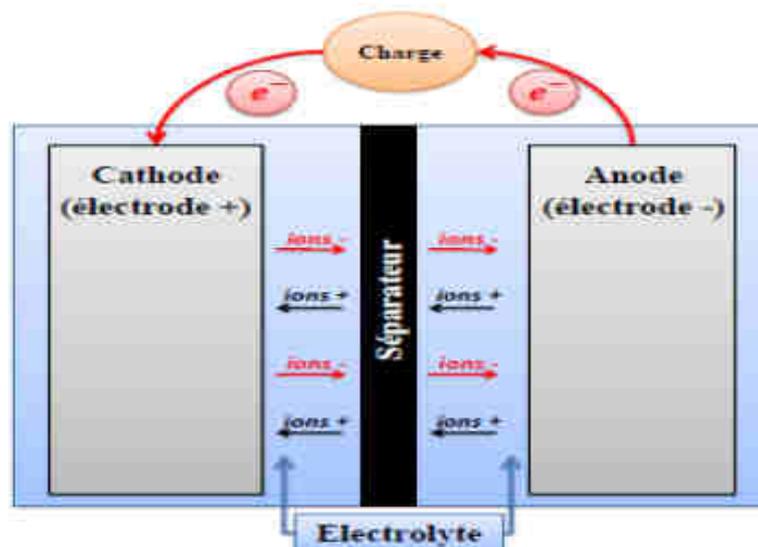


Figure II.40: Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion [6].

Le tableau II.1 résume les différentes caractéristiques pour différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques.

**Tableau II.1:** les différentes caractéristiques pour différents types de batteries [22].

System	Nominal cell voltage (V)	Specific energy (Wh/kg)	Cycle life (up to 80% initial capacity)	Charge time (h)	Self-discharge per month (%)
Lead-acid	2	30-50	200-350	8-16	5
Ni-Cd	1.25	45-80	1500	1	20
Ni-MH	1.25	60-120	300-500	2-4	30
Li ion	3.6	110-180	500-1000	2-4	10

### II.2.6.3 Modélisation de la batterie lithium :

#### A. Modèle statique:

Le modèle le plus simple de batterie est le modèle statique ( $E_0$ ,  $R$ ) à paramètres constants, qui implémente l'équation suivante :

$$V_{Batt} = E_0 - RI_{Batt} \quad (II.79)$$

Avec :

$R$  : Résistance interne de la batterie

$E_0$ : F.é.m. à vide (force électromotrice)

La variation de tension en fonction du courant prélevé à la batterie  $I_{batt}$  est ainsi modélisée. La valeur du paramètre  $R$  est une donnée connue du constructeur. Elle peut également être déduite de courbes de tension issues d'essais (de même que le paramètre  $E_0$ ). Le paramètre  $E_0$  étant constant, l'état de charge de la batterie ne varie pas. Ce modèle à quantité d'énergie infinie ne convient donc pas à une étude d'autonomie [20].

#### B. Modèle dynamique

L'ajout d'un élément capacitif introduit une dynamique dans le modèle (Figure III.39).

L'équation désormais implémentée est la suivante :

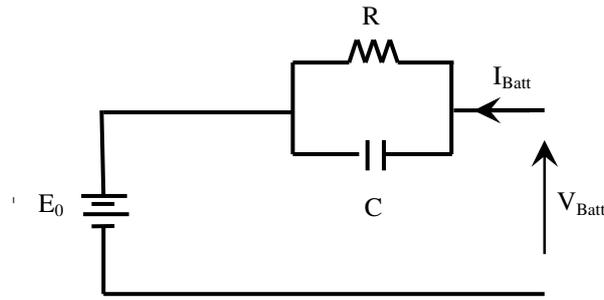


Figure II.41 : Modèle de batterie ( $E_0$ ,  $R$ ,  $C$ )

Dans ce modèle on introduire l'équation suivant :

$$V_{Batt} = E_0 - \frac{R}{1.R.C.p} . I_{Batt} \quad (\text{II.80})$$

Les valeurs des paramètres  $E_0$ ,  $R$  et  $C$  sont calculées à partir de données d'essais (ou de courbes constructeur).

### II.2.6.3.1 Etat de charge d'une cellule de la batterie

Le SOC correspond à la quantité de charge, notée  $C_N$ , pouvant être restituée par la batterie par rapport à sa capacité nominale, notée  $C_{N0}$  et correspondant à SOC=100% (batterie pleinement chargée) :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - 100 \frac{C_N(t)}{C_{N0}} \quad (\text{II.81})$$

$$C_N = \frac{1}{3600} \int_{t_0}^t I_{Batt}(t) dt$$

$C_N$  Et  $C_{N0}$  la capacité actuelle et initiale du cellule sont exprimés en [A.h] ; SOC est sans unité compris ente 0 et 100. La tension  $V_{Batt}$  est fonction du SOC, de la température  $T^\circ$  du pack et du courant  $I_{Batt}$  selon une relation non explicitée :

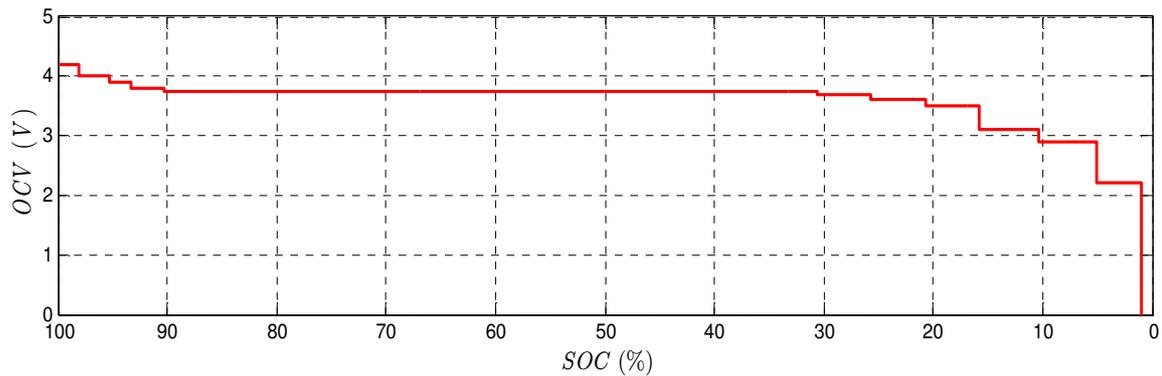
$$V_{Batt}(t) = f(SOC(t), T^\circ, I_{Batt}(t))$$

Les paramètres de ce modèle sont donc  $C_{N0}$  et la fonction  $f(SOC(t), T^\circ, I_{Batt}(t))$ . Toute technologie de batterie sans restriction peut être représentée par ce modèle.

$I_{Batt}$  C'est le courant qui travers la batterie exprimé en [A].

SOC( $t_0$ ) représente l'état de charge à l'instant initial  $t_0$  entre 0 et 100 et constitue un paramètre de simulation.

La tension d'une cellule dépend du type de technologie utilisé (type de batterie) ; elle peut être variable en fonction de l'état de charge SOC( $t$ ) et en fonction de la densité massique des cellules. Dans la littérature, on peut trouver plusieurs courbes qui donnent cette relation de la tension d'une cellule en fonction de l'état de charge de la batterie SOC( $t$ ) et de la température  $T^\circ$ , elle est nommée OCV (cartographie de tension à vide aux bornes d'une cellule), on peut représenter cette caractéristique par la figure (II.40) :



**Figure II.42:** La tension à vide (OCV) aux bornes d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC.

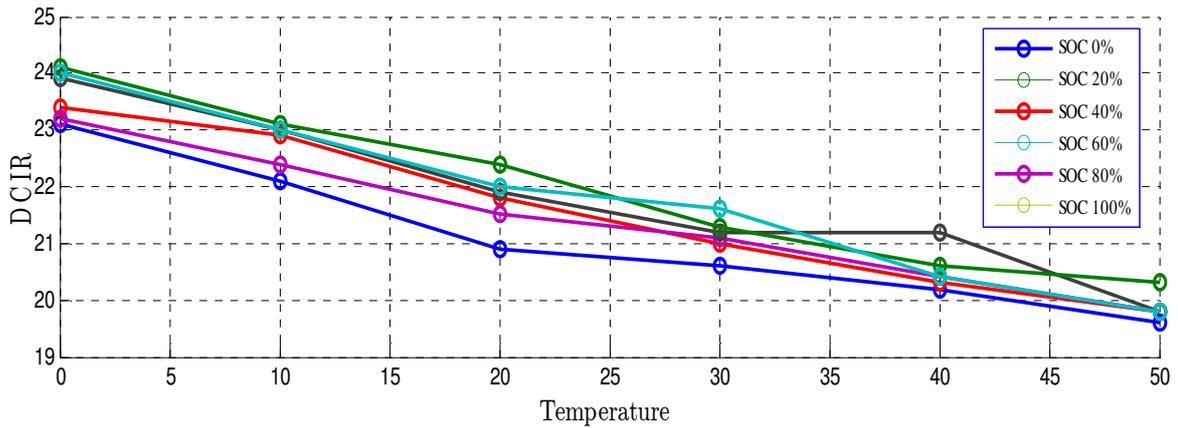
Pour continuer la modélisation de la batterie, on peut écrire la formule suivante :

$$\begin{aligned} V_{cel} &= V_{cel}(SOC) - V_{per} \\ &= V_{cel}(SOC) - R_{int} \cdot I_{cel} \end{aligned} \quad (II.82)$$

Avec:

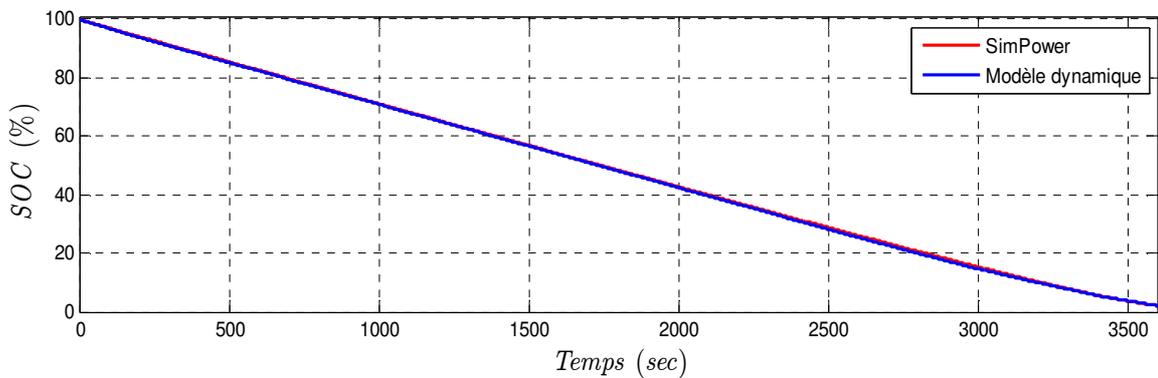
- $V_{cel}$  : La tension d'une cellule.
- $V_{cel}(SOC)$  : La tension fournie par une cellule en fonction de SOC.
- $V_{per}$  : La tension des pertes internes d'une cellule.

La tension  $V_{per}$  dépend de la résistance interne de la cellule  $R_{int}$  et du courant  $I_{cel}$  (équation II.42), cette dernière varie, à son tour, en fonction de l'état de charge  $SOC(t)$  et de température  $T^\circ$ . La résistance interne d'une cellule (nommée DCR) peut être donnée par la figure suivante :

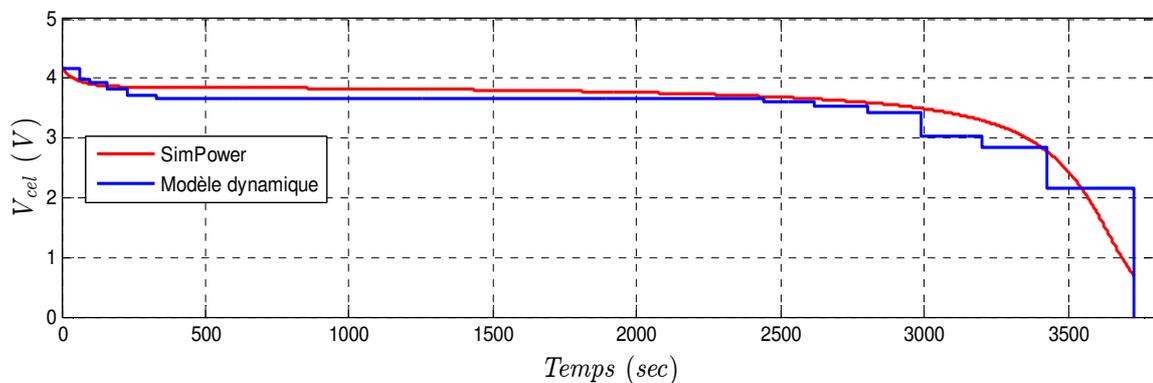


**Figure II.43:** La résistance interne (DCR) d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC et la T (°C).

Jusqu'à présent nous avons présenté la modélisation et les principes de fonctionnement d'une seule cellule Li-ion. Il est possible alors de tracer l'évolution des variables d'une cellule en situation de décharge de la cellule uniquement du point de vue variation de tension à ses bornes. Les figures suivantes montrent l'état de charge de la cellule SOC(t) la diminution de la tension de la cellule  $V_{cel}(t)$  en fonction du temps et de l'état de charge :



**Figure II.44:** L'état de charge (SOC) en fonction du temps.



**Figure II.45:** la tension fournie par une cellule en fonction de temps.

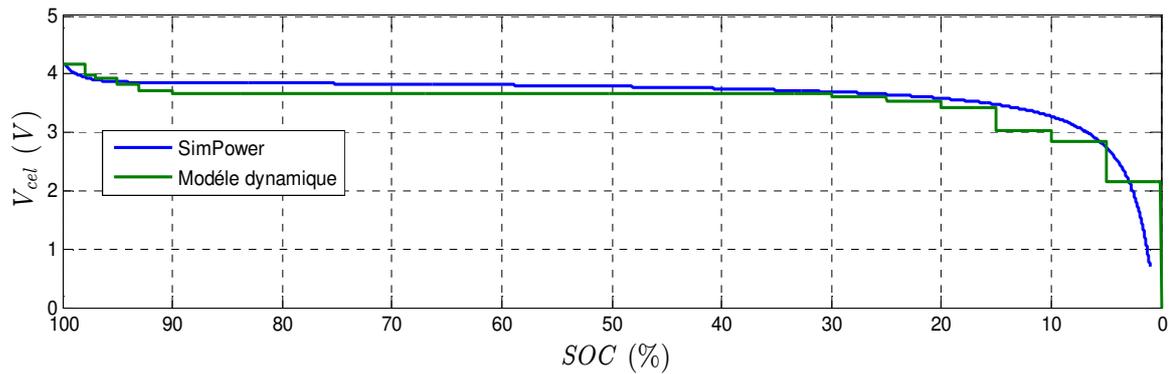


Figure II.46: la tension fournie par une cellule en fonction de SOC.

Dans les figures précédentes, nous avons tracé les variables à partir du modèle, donné précédemment, mais nous avons préféré de représenter aussi un modèle d'une cellule Lithium-ion trouvé dans le bloc SimPowerSystems, juste pour comparaison, en utilisant le Logiciel MATLAB Simulink.

II.2.6.3.2 De la cellule au pack :

L'hypothèse d'équilibrage des cellules est importante, car cela signifie que chaque cellule présente les mêmes caractéristiques (même courbe de décharge). Le pack ne présente pas de dispersion et toutes les cellules ont vieilli de la même façon. L'état de charge (SOC) d'une cellule coïncide alors avec l'état de charge du pack [20]

Le modèle de pack se construit ainsi aisément à partir du modèle de cellule (Figure II.45) :

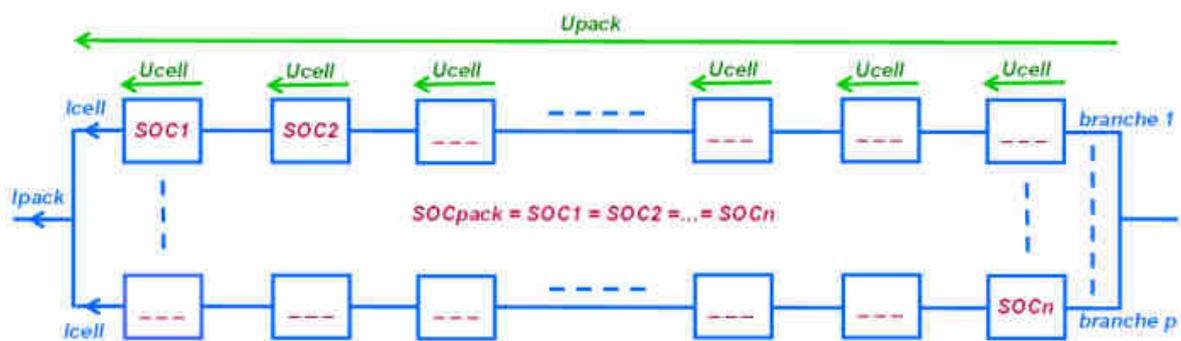


Figure II.47: la tension d'une cellule au pack batterie.

Donc d'après la figure précédente, on peut déduire la tension et le courant de sortie de batterie si nous connaissons la structure (série et parallèle des cellules et des branches). Les principaux variables d'une batterie peuvent être donnés par les équations suivantes :

$$I_{pac} = \sum_{i=1}^p I_{cel} = p \cdot I_{cel} \quad (\text{II.83})$$

$$V_{pac} = \sum_{i=1}^m V_{cel} = m \cdot V_{cel} \quad (\text{II.84})$$

$$SOC_{pack} = SOC_{1\dots n} \quad (\text{II.85})$$

Avec :

$I_{pac} = I_{bat}$  : Le courant d'un pack (batterie).

$V_{pac} = V_{bat}$  : Le courant d'un pack (batterie).

$p$  : Nombre de branches

$m$  : Nombre de cellules par branche

$n = m \cdot p$  : Nombre total de cellules.

Si nous supposons que nous avons une batterie avec  $m=96$  cellules et  $p=2$  branches, il sera possible de tracer l'évolution de  $V_{bat}$  et  $I_{bat}$  d'une batterie en situation de décharge et en fonction de l'état de charge  $SOC(t)$ . Une charge résistive de  $R=3\Omega$  est utilisé pour garantir la décharge de la batterie.

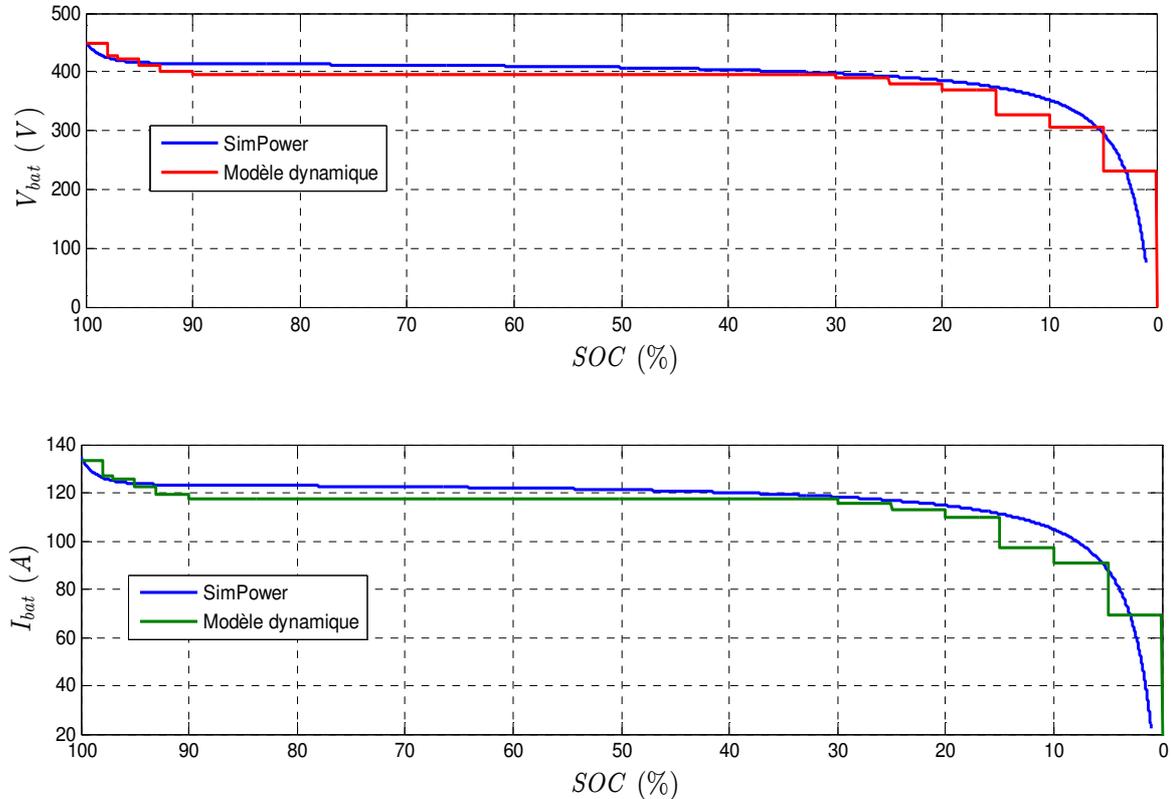


Figure II.48 : Tension et courant en situation de décharge d'une batterie Lithium-ion.

**II.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude structurale et une modélisation de la chaîne de traction. Nous avons réalisé une modélisation élément par élément, en incluant le modèle de véhicule, la transmission, le moteur électrique (MSRB), l'électronique de puissance : Deux hacheurs Buck, l'un est dédié pour chargement du batterie, et l'autre dédié pour l'excitation du moteur et un hacheur Buck-Boost dédié pour l'observation de la tension de sortie de la batterie en obtenant une tension de 400V constante, et un onduleur qui permet la conversion de la tension pour l'alimentation du moteur. Nous avons constaté que les véhicules électriques sont des systèmes complexes avec plusieurs comportements : électrique, magnétique, mécanique, chimique (batterie), aérodynamique et thermique, entre autres. L'objectif était de comprendre le fonctionnement de chaque élément important dans la composition et le fonctionnement du véhicule électrique.

Cependant, certains éléments n'ont pas été modélisés dans ce chapitre, tels que la batterie d'accessoires (batterie 14V), le redresseur (pour la charge du batterie lié avec un borne de recharge), ainsi que le modèle de comportement thermique (thermique de l'onduleur, du MS et des deux batteries). Au cours de la modélisation de la chaîne de traction, nous avons remarqué que les grandeurs des différents éléments sont interdépendantes et complémentaires (par exemple, lorsque nous modifions les tensions du MSRB, la géométrie du véhicule ou le couple résistant, toutes les grandeurs deviennent variables).

Pour conclure ce deuxième chapitre consacré à la modélisation, nous pouvons affirmer que tous les modèles décrits précédemment sont compatibles du point de vue des entrées et des sorties. Dans le prochain chapitre, nous allons commander la partie puissance de la chaîne de traction.

***Chapitre III :***  
***Etude de commande d'un système de***  
***puissance d'un VE***

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre on se concentre sur un aspect essentiel des véhicules électriques : la commande de l'électronique de puissance et de la machine. Dans ce chapitre, nous aborderons les principes fondamentaux de la commande et son rôle crucial dans le fonctionnement optimal et la performance des composants clés du véhicule électrique.

Dans ce chapitre, nous explorerons les principes et les techniques de commande utilisés dans les véhicules électriques. Nous commencerons par une présentation des différents types de convertisseurs de puissance utilisés, tels que les onduleurs, les convertisseurs DC-DC et les convertisseurs de charge. Nous nous appliquons la technique du MLI sinusoïdale pour commander la partie d'électronique de puissance.

Ensuite, nous nous pencherons sur les techniques de commande de la machine électrique elle-même, en mettant l'accent sur les méthodes de commande vectorielle, qui permettent de contrôler indépendamment le flux magnétique et le couple en appliquant la commande en boucle fermée.

### **III.2 Présentation du système de puissance étudié**

Les éléments du système de puissance du véhicule que nous avons étudié sont représentés sous une forme très simplifiée sur la figure II.24. Un moteur électrique synchrone composé d'un stator, d'un rotor bobiné, d'une électronique de puissance un peu complexe constitué des convertisseurs DC-DC, des convertisseurs AC-DC et DC-AC, qui assurent la communication entre l'électronique du moteur et les éléments externes comme la batterie, les conducteurs d'entrées et de sorties [20]. Le système doit avoir, en conséquence, des éléments de filtrage ainsi que des relais qui assurent la reconfiguration de l'étage d'entrée pour garantir une charge ou une traction[6]. Pour bien représenter le système de puissance étudié nous avons opté à une autre représentation plus explicite du système de puissance, elle est donnée par la figure III.1. Sur cette figure, il apparaît clairement un bloc d'électronique de puissance à l'entrée qui comprend un pont triphasé redresseur alternatif/continu, un circuit triphasé à onduleur à deux niveaux qui alimente la machine synchrone à rotor bobiné ainsi que des convertisseurs continu-continu DC-DC pour l'alimentation des différents éléments du système, à savoir, pour la batterie, pour l'excitation de la machine synchrone ou pour l'alimentation de l'onduleur. Le chargeur et l'onduleur sont tous deux connectés à la machine électrique ou à des parties de celle-ci.

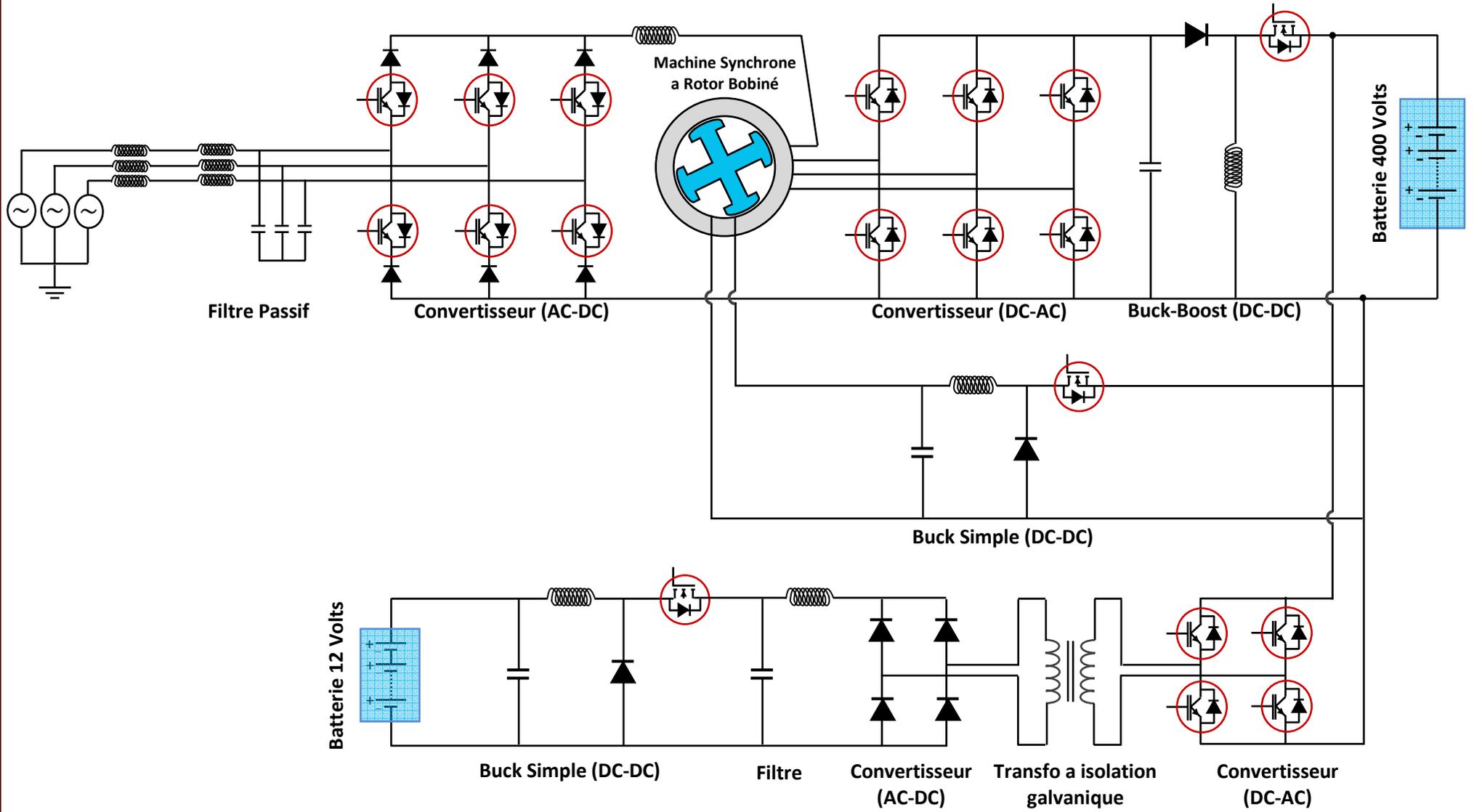


Figure III.1 : Schéma du système de puissance étudié

Il est à noter que, sur le système de puissance de la figure III.1, des réductions d'encombrement et de coûts sont obtenues grâce à l'intégration de onduleur en chaîne de traction ainsi que l'intégration des enroulements de la machine électrique dans le circuit d'alimentation de charge de la batterie, comme illustré. De plus, le chargeur a été conçu à l'origine selon un cahier des charges irréversible. En fait, l'étage d'entrée du chargeur est un redresseur unidirectionnel de courant. L'étage de sortie réutilise les bobinages de la machine synchrone ainsi que l'onduleur pour former un convertisseur dc-dc Boost pour la charge de la batterie.

### III.3 Commande du système de puissance d'un véhicule électrique :

La connexion du système de puissance d'un véhicule électrique est conditionnée par la combinaison harmonieuse de deux composants essentiels : la partie motrice et la partie électronique de puissance. Le système de puissance doit être commandé pour assurer un fonctionnement optimal et efficace du véhicule électrique. La commande du système de puissance permet de réguler et de contrôler les différents composants pour garantir des performances optimales, une gestion de l'énergie efficace et une sécurité accrue.

Dans notre étude de commande, nous allons diviser en deux parties distinctes. La première partie sera consacrée à l'électronique de puissance, tandis que la deuxième partie se concentrera sur le contrôle du moteur. Chaque élément de notre système sera commandé à l'aide de méthodes avancées, que nous définirons prochainement.

#### III.3.1 Stratégie de commande des hacheurs :

La stratégie de contrôle que nous avons proposée dans la figure III.3 se compose d'une régulation PID liée avec une fonction de transfert à une boucle fermée. Chaque type d'hacheur a leur fonction de transfert et donc chaque convertisseur ont leurs propres paramètres de régulations.

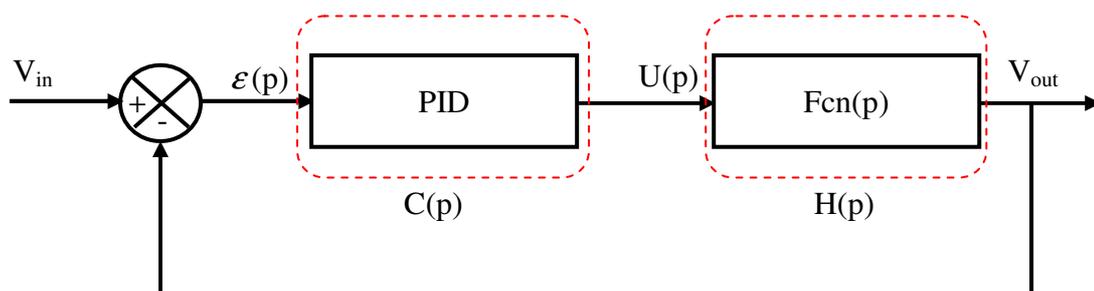


Figure III.2 : Schéma du PID en boucle fermée

III.3.1.1 Hacheur Buck :

Pour commander l'hacheur Buck, on utilisant la fonction du transfert pour estimer les paramètres du régulateur PID, qu'on peut les utiliser pour simuler ce hacheur par sa fonction du transfert et son modèle dynamique.

D'après les équations du chapitre précédent et la figure (II.15) :

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}v_C + \frac{d}{L}u \quad (II.1)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_C \quad (II.2)$$

D'après l'équation (II.2) :

$$i_L = C.v_C + \frac{1}{R}v_C \quad (II.3)$$

$$C.\ddot{v}_C + \frac{1}{R}\dot{v}_C = -\frac{1}{L}v_C + \frac{d}{L}u \quad (II.4)$$

$$\left( Cp^2 + \frac{1}{R}p + \frac{1}{L} \right) v_C(p) = \frac{d}{L}u(p)$$

Alors on peut trouver la fonction du transfert suivante :

$$H(p) = \frac{d/L}{Cp^2 + \frac{1}{R}p + \frac{1}{L}} \quad (II.5)$$

$$H(p) = \frac{d}{LCp^2 + \frac{L}{R}p + 1}$$

Avant de simuler le convertisseur en boucle fermée on doit estimer les paramètres du régulateur PID par la méthode automatique qui nécessite la fonction du transfert :

$$H(p) = \frac{v_C(p)}{v_e(p)} = \frac{d}{LCp^2 + \frac{L}{R}p + 1} = \frac{d.R}{LCRp^2 + Lp + R} \quad (II.7)$$

$$H(p) = \frac{v_C(p)}{d(p)} = \frac{v_e(p)}{LCp^2 + \frac{L}{R}p + 1} = \frac{v_e.R}{LCRp^2 + Lp + R} \quad (II.8)$$

D'après la structure du régulateur PID :

$$U(p) = \left( K_p + K_i \frac{1}{p} + K_d p \right) . \mathcal{E}(p) \quad (II.9)$$

$$\Rightarrow C(p) = \left( \frac{K_d p^2 + K_p p + K_i}{p} \right)$$

$$\begin{aligned}
 C(p) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i p} + \tau_d p \right) \cdot \mathcal{E}(p) \\
 &= K_p \left( \frac{\tau_i \tau_d p^2 + \tau_i p + 1}{\tau_i p} \right)
 \end{aligned}
 \tag{III.10}$$

Maintenant on cherche les paramètres  $K_p, K_i, K_d$  en boucle ouverte :

$$C(p) \cdot H(p) = \left( \frac{K_d p^2 + K_p p + K_i}{p} \right) \cdot \left( \frac{v_e}{LCRp^2 + \frac{L}{R} p + 1} \right)
 \tag{III.11}$$

D'après l'équation (III.11), on trouve :

$$K_p = \frac{L}{R}, \quad K_i = 1, \quad K_d = LC$$

Dans notre cas, la fonction du transfert est en deuxième ordre, pour cela on passe en boucle fermé pour rendre notre système en premier ordre :

$$\begin{aligned}
 H(p) &= \left( \frac{v_e}{p} \right) \\
 H(p) &= \frac{\frac{v_e}{p}}{1 + \frac{v_e}{p}} = \frac{1}{\frac{1}{v_e} p + 1} = \frac{1}{\tau p + 1}
 \end{aligned}
 \tag{III.12}$$

Avec :

$$\tau = \frac{1}{v_e}$$

On peut aussi utiliser une méthode similaire qui se base sur la recherche des  $K_p, K_i, K_d$  en

fonction de  $\tau_i, \tau_d$  :

On introduit la fonction du transfert en boucle ouverte :

$$C(p) \cdot H(p) = K_p \left( \frac{\tau_i \tau_d p^2 + \tau_i p + 1}{\tau_i p} \right) \left( \frac{v_e}{LCRp^2 + \frac{L}{R} p + 1} \right)
 \tag{III.13}$$

$$C(p) \cdot H(p) = K_p \left( \frac{v_e}{\tau_i p} \right)
 \tag{III.14}$$

D'après l'équation (III.13) on trouve :

$$\tau_i \tau_d = LC \Rightarrow \tau_i = \frac{L}{R}, \tau_d = RC$$

Ce système est donc apparaitre en seconde degré, on a besoin d'une boucle fermée pour obtient un résultat du premier ordre :

$$C(p).H(p) = \frac{\frac{K_p v_e}{\tau_i p}}{1 + \frac{K_p v_e}{\tau_i p}} = \frac{1}{\frac{\tau_i}{K_p v_e} p + 1} \tag{III.15}$$

$$\theta = \frac{\tau_i}{K_p v_e} = \frac{L}{K_p v_e R} \tag{III.16}$$

Alors :

$$K_p = \frac{L}{\theta v_e R} \tag{III.17}$$

Avant de simuler, nous avons précisé qu'on doit utiliser deux hacheur Buck, l'un des deux qui permettent la charge de la batterie 12V, pour cela on a préféré de donner le cycle de charge optimale d'une batterie sur une figure (voir annexe).

Donc on peut introduire le constant du temps  $\theta$  pour contrôler la valeur de  $K_p$ , pour cela on obtient les résultats suivants :

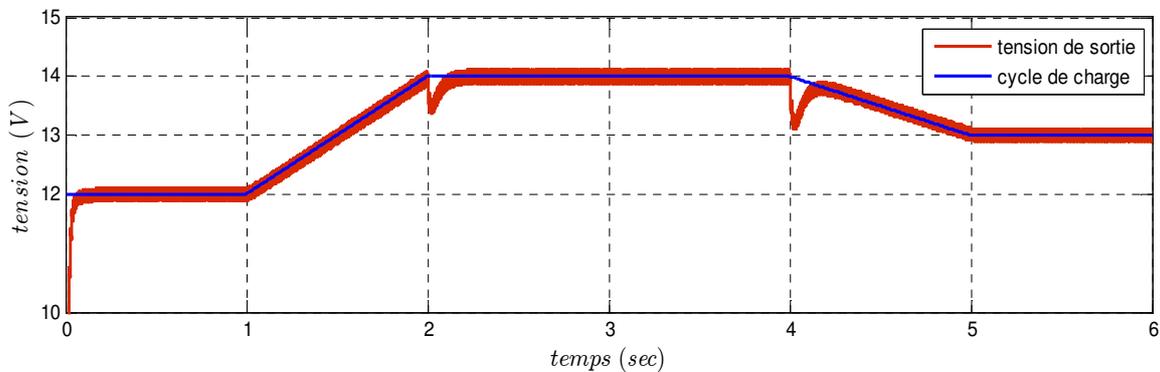


Figure III.3: La tension de la sortie dans le cas d'hacheur Buck 80V au 14V.

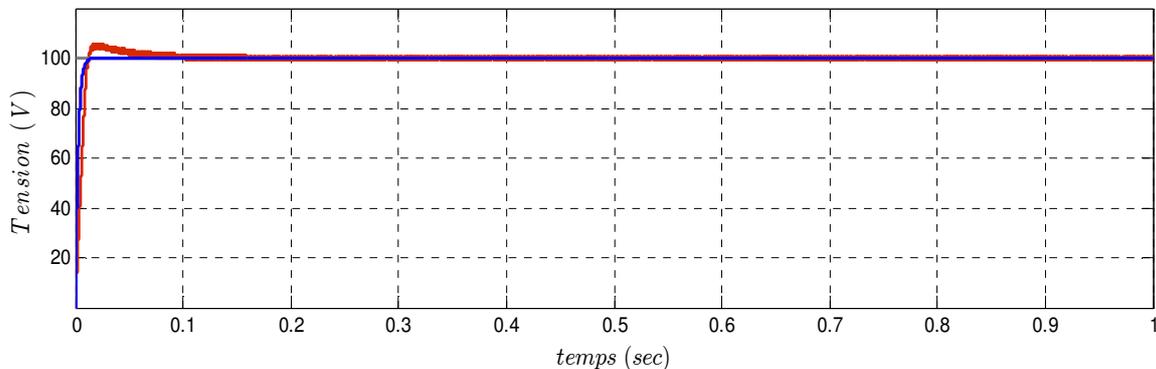


Figure III.4 : La tension de la sortie dans le cas d'hacheur Buck 400V au 100V.

On remarque, d'après les résultats, que notre tension suit la référence. Dans la figure (III.1), il est représenté le hacheur Buck destiné à la charge de la batterie 12V, on constate que la tension suit la référence que nous avons imposée (le cycle de charge).

Quant au deuxième hacheur Buck, qui est destiné à l'excitation du moteur, il présente un résultat parfait qui suit la référence.

**III.3.1.2 Hacheur Buck Boost :**

Pour commander l'hacheur Buck Boost en boucle fermée en utilisant un régulateur PID, il est nécessaire de commencer par trouver la fonction de transfert commandée en fonction du rapport cyclique (d). Ensuite, il faut estimer les paramètres  $K_p, K_i, K_d$  du régulateur à l'aide de la méthode de Ziegler-Nichols, ce qui nous permet d'obtenir de bons résultats. Selon les équations précédentes du chapitre II et la figure (II.13), nous pouvons rechercher la fonction de transfert en fonction du rapport cyclique.

A l'état « On »:

$$\dot{i}_L = \frac{1}{L}u \tag{III.18.a}$$

$$\dot{v}_c = -\frac{1}{RC}v_c \tag{III.18.b}$$

A l'état « Off »:

$$\dot{i}_L = \frac{1}{L}v_c \tag{III.19.a}$$

$$v_c = -\frac{1}{RC}v_c - \frac{1}{C}i_L \tag{III.19.b}$$

D'après les équations (III.18) et (III.19) :

$$\dot{i}_L = \frac{1-d}{L}v_c + \frac{d}{L}u \tag{III.20.a}$$

$$\dot{v}_c = -\frac{1-d}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_c \tag{III.20.b}$$

$$\dot{i}_L = \frac{1}{L}V_c - \frac{d}{L}V_c + \frac{d}{L}u \tag{III.21.a}$$

$$\dot{V}_c = -\frac{1}{C}i_L + \frac{d}{L}i_L - \frac{1}{RC}V_c \tag{III.21.b}$$

$$\begin{aligned}
 H(p) &= \frac{V_c}{u} \\
 i_L &= -\frac{C}{1-d} \dot{V}_c - \frac{1}{R(1-d)} V_c \\
 &= \frac{1}{1-d} \left( -C \dot{V}_c - \frac{1}{R} V_c \right) \\
 \dot{i} &= \frac{1}{1-d} \left( -C \ddot{V}_c - \frac{1}{R} \dot{V}_c \right)
 \end{aligned} \tag{III.22}$$

D'après l'équation (III.21.a) :

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{1-d} \left( -C \ddot{V}_c - \frac{1}{R} \dot{V}_c \right) &= \frac{1-d}{L} V_c + \frac{d}{L} u \\
 -\frac{C}{1-d} \ddot{V}_c - \frac{1}{R(1-d)} \dot{V}_c - \frac{1-d}{L} V_c &= \frac{d}{L} u \\
 H(p) &= \frac{\frac{d}{L}}{-\frac{C}{1-d} p^2 - \frac{1}{R(1-d)} p - \frac{1-d}{L}} = \frac{d}{-\frac{CL}{1-d} p^2 - \frac{L}{R(1-d)} p - (1-d)}
 \end{aligned} \tag{III.23}$$

A la fin on trouve notre fonction du transfert en fonction du rapport cyclique :

$$H(p) = \frac{-d}{\frac{LC}{(1-d)} p^2 + \frac{L}{(1-d)} p + (1-d)} \tag{III.24}$$

Pour commander l'hacheur Buck-Boost on va utiliser soit la fonction du transfert ou bien par le Schéma bloc du Simulink, d'où c'est délicat pour qu'on soit estimer les valeurs des paramètres du PID exacte car notre système est compliqué, et pour cela il existe plusieurs méthode. Nous avons le choix d'utiliser la méthode de Ziegler-Nichols (voire l'annexe).

Après avoir appliqué la méthode de Ziegler-Nichols en obtenant les valeurs nécessaire pour le régulateur, on peut maintenant introduire les résultats suivant :

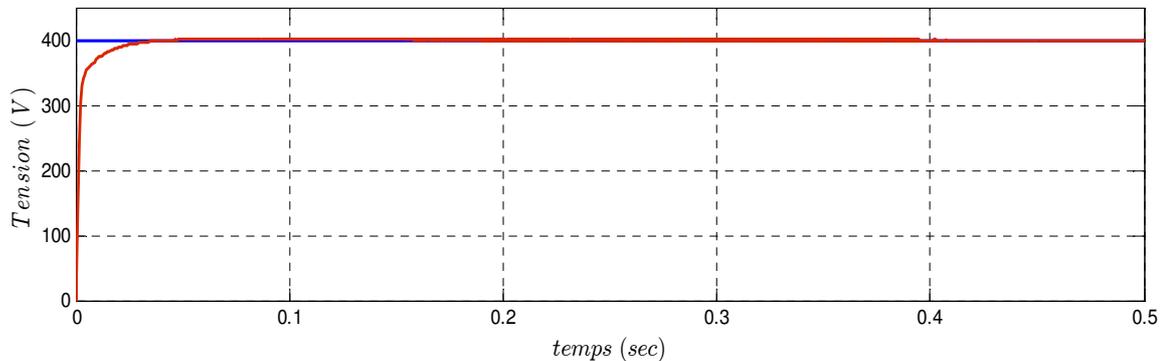


Figure III.5 : La tension de sortie dans le cas d'un hacheur Buck-Boost.

Dans le cas de ce hacheur Buck-Boost, on remarque que la tension souhaitée suit toujours la référence, malgré la variation de la tension d'entrée entre 420V et 380V. Cependant, pour la commande de l'onduleur, il est nécessaire que cette tension soit fixée à 400V.

### III.3.2 Stratégie de commande des onduleurs :

Dans le chapitre précédent on a utilisé la commande 180° (sans MLI) pour pouvoir d'obtenir des tensions et des courant qu'on a besoin. Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante. Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par différents auteurs.

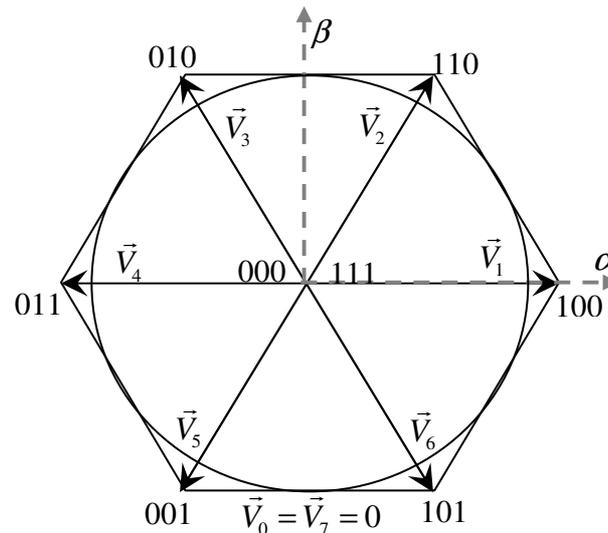
Dans la littérature il existe plusieurs commande en modulation par largeur d'impulsion qu'on va les définir au dessous :

- MLI Triangulo Sinusoïdale.
- MLI vectorielle.
- MLI par hystérésis...etc

#### III.3.2.1 MLI vectorielle :

Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension possède six cellules de commutation, donnant huit configurations possibles. Ces huit états de commutation peuvent s'exprimer dans le plan (  $\alpha\beta$  ) par huit vecteurs de tension notés de  $\vec{V}_0$  à  $\vec{V}_7$  ; parmi ces vecteurs, deux sont nuls, les autres étant répartis régulièrement à tous les 60°.

Le principe de MLI vectorielle consiste à projeter le vecteur  $V_s$  de tension statorique désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant à deux états de commutation de l'onduleur. Les valeurs de ces projections, assurant le calcul des temps de commutations désirées, correspondent à deux états non nuls de commutation de l'onduleur. Si nous notons  $t_i$  et  $t_{i+1}$  ces deux temps, leur somme doit être inférieure à la période  $T_{com}$  de commutation de l'onduleur. Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué durant une durée complémentaire à  $T_{com}$  [1].



**Figure III.6 :** approximation du vecteur de référence par les tensions d'alimentation

### III.3.2.2 MLI triangulo-sinusoïdale :

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de  $2\pi/3$  à la même fréquence  $f_s$ . Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette MLI sert à remédier ces problèmes et elle à comme avantages [8] :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie,
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

D'autre part les conséquences de ces deux avantages sont :

- Minimisation de la distorsion du courant,
- Faible coût du filtre de sortie.

#### Propriétés :

Cette technique est caractérisée par deux paramètres :

- Indice de modulation de fréquence

C'est le rapport entre la fréquence de la porteuse  $f_s$  et celle de la modulante  $f_m$  :

$$m_f = \frac{f_s}{f_m} \tag{III.25}$$

- indice de modulation d'amplitude

C'est le rapport entre l'amplitude de modulante  $V_0^*$  et celle de la porteuse  $V_t$  :

$$m_a = \frac{V_0^*}{V_t} \tag{III.26}$$

La tension de sortie a une composante fondamentale et des harmoniques. Le fondamentale de la tension de sortie  $V_0$  a la même fréquence que la modulante  $V_0^*$ , et son amplitude est donnée par :

$$V_0 = \frac{V_0^*}{V_t} V_{dc} = m_a \cdot V_{dc} \tag{III.27}$$

- Tensions de référence :

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé permettent de générer un système de tension triphasé équilibré directe sont :

$$\begin{cases} V_{réf1} = \frac{V_{dc}}{2} \sin(\omega t) & \text{(III.28.a)} \\ V_{réf2} = \frac{V_{dc}}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \text{(III.28.b)} \\ V_{réf3} = \frac{V_{dc}}{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \text{(III.28.c)} \end{cases}$$

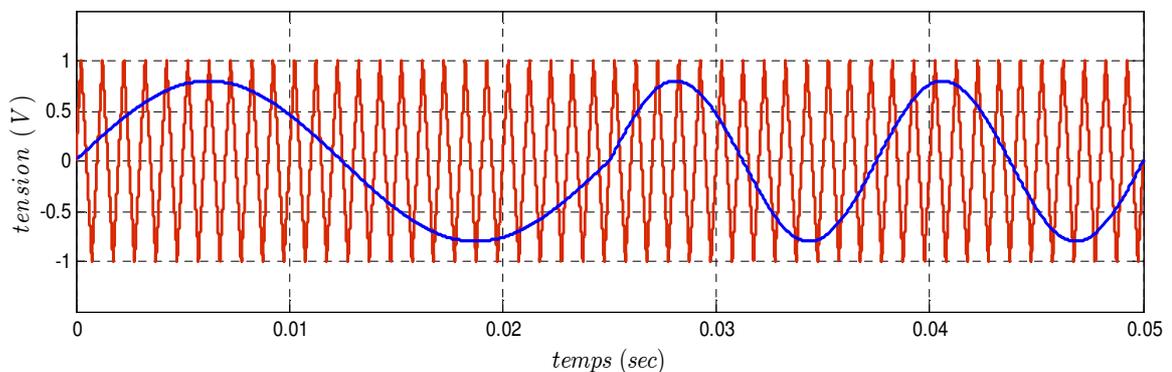
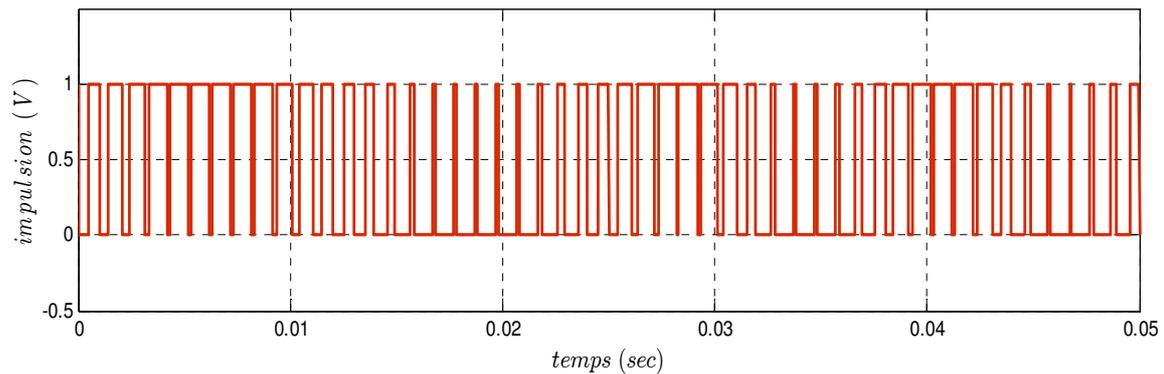
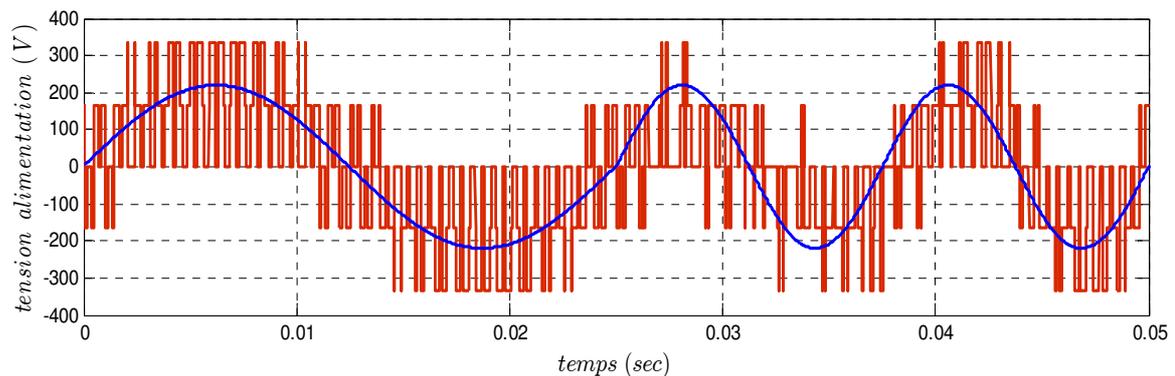


Figure III.7 : principe du MLI triangulo-sinusoïdale.



**Figure III.8:** les impulsions de commande.



**Figure III.9:** la tension de phase  $v_a$  en fonction du  $v_{ref}$

Selon la figure III.7, on observe que notre signal de comparaison de modulation avec la porteuse suit  $m=0.8$ , ce qui nous donne une amplitude de tension de  $m=0.8$  avec un signal triangulaire de porteuse.

En ce qui concerne la figure III.9, on remarque que notre tension de sortie suit la référence imposée par l'onduleur malgré la variation de fréquence. Cette variation de fréquence représente la variation de la vitesse du moteur dans le cas réel.

Pour assurer le bon fonctionnement de l'onduleur, nous avons effectué des tests avec une tension d'entrée de 500V. À la sortie, nous obtenons une tension équivalente à  $(2 \cdot V_e / 3)$ , ce qui valide notre modèle.

### III.3.3 Stratégie de commande des moteurs :

Il existe plusieurs stratégies de commande pour les moteurs électriques, chacune adaptée à des applications et des objectifs spécifiques. On peut citer quelques commandes essentielles les plus utilisées tels que : la commande scalaire, vectorielle, DTC, Prédictive, Non-linéaire...etc

**III.3.3.1 La commande scalaire :**

Les stratégies de commande scalaire d'une machine asynchrone (MAS) reposent sur la manipulation directe de grandeurs variables telles que la tension, le courant et la fréquence, sans tenir compte de la phase. Bien qu'elles soient faciles à mettre en œuvre, ces stratégies présentent l'inconvénient de performances dynamiques limitées. La stratégie de commande scalaire la plus répandue consiste à ajuster la tension d'alimentation  $V_s$  au stator de manière à maintenir constant le flux ou le rapport entre la tension et la fréquence ( $V/f$ ) lorsqu'on fait varier la fréquence. Cette stratégie de commande peut être mise en œuvre en boucle ouverte ou en boucle fermée.

**III.3.3.2 La commande directe du couple :**

La commande directe du couple (DTC) est une stratégie de contrôle avancée principalement utilisée dans les moteurs asynchrones (également appelés moteurs à induction) et les moteurs synchrones à aimants permanents. Il permet un contrôle direct du couple et de la vitesse du moteur, fournit une réponse dynamique élevée et améliore la précision du contrôle.

Dans le contrôle direct du couple, la quantité de contrôle est le flux statorique et le couple électromagnétique du moteur, qui est directement contrôlé sans modèles mathématiques complexes du moteur.

**III.3.3.3 La commande vectorielle :**

Il existe deux types de cette commande : La commande vectorielle directe nécessite la connaissance du flux réel pour pouvoir effectuer sa régulation, tandis que la commande indirecte ne tient pas en considération ce flux et fait quelques approximations.

**III.3.3.3.1 Commande vectorielle directe :**

Ce type de commande exige la connaissance du module et de la phase du flux à tout instant. Une première méthode consiste à mesurer directement le flux de la machine à l'aide de capteurs positionnés dans l'entrefer et d'en déduire l'amplitude et la phase. Les capteurs sont soumis à des conditions extrêmes (la température, vibrations, etc....) de plus la mesure est entachée de bruits dépendant de la vitesse causés par les encoches, ce qui nécessite du filtrage à fréquence variable. Cette mesure permet de concevoir une commande complètement découplée (flux et couple) par contre l'installation de capteurs du flux augmente le coût de fabrication. Pour cette raison, une deuxième méthode est celle

de l'estimation (boucle ouverte) ou observation (boucle fermée) du flux à partir de mesures classiques (courant, tension, vitesse).

**III.3.3.2 Commande vectorielle indirect :**

Dans ce type de commande, le flux 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 à la commande directe, ceci est du à la sensibilité de ce type de commande face aux variations de la constante de temps rotorique. L'avantage est que cette commande nécessite peu de temps de calcul dans le microprocesseur. Dans le cadre de ce projet, c'est la commande vectorielle indirecte qui sera traitée.

Dans notre cas on choisi l'axe 'q' comme axe de rotation pour cela notre paramètre de référence sera  $\Omega^*$  et  $I_d^*=0$ .

- Tension :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \Omega_r \varphi_{sq} \tag{III.29.a}$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \Omega_r \varphi_{sd} \tag{III.29.b}$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \tag{III.29.c}$$

Avec :

$$\Omega_r = p.\omega$$

- Flux :

$$\varphi_{sd} = L_d i_{sd} + M_{fd} i_f \tag{III.30.a}$$

$$\varphi_{sq} = L_q i_{sq} \tag{III.30.b}$$

$$\varphi_f = L_f i_f + M_{fd} i_{sd} \tag{III.30.c}$$

- Couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \tag{III.31}$$

**A. Découplages des courants :**

L'onduleur étant un onduleur de tension, Il nous faut donc définir les fonctions de transfert appliquées entre  $V_d$ ,  $V_q$  et  $I_d$ ,  $I_q$  En dérivant (III.30) par rapport au temps et en injectant ces résultats dans (II.29), nous obtenons :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} + M_{fd} \frac{di_f}{dt} - \Omega_r L_q i_{sq} \quad (III.32.a)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \Omega_r (L_d i_{sd} + M_f i_f) \quad (III.32.b)$$

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fd} \frac{di_{sd}}{dt} \quad (III.32.c)$$

Nous avons choisi l'axe 'q' comme axe de référence pour notre étude, ce qui implique que  $I_d=0$  pour les deux équations du compensation, alors :

D'après l'équation (III.32.a), on aura le premier terme de découplage :

$$v_{sd}^* = comp_d = M_{fd} \frac{di_f}{dt} - \Omega_r \varphi_{sq} \quad (III.33)$$

D'après l'équation (III.32.b), on aura le deuxième terme de découplage :

$$v_{sq}^* = comp_q = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \Omega_r M_f i_f \quad (III.34)$$

**B. La boucle de commande :**

Avant de passer vers la régulation de la vitesse et de couple, on doit imposer la relation du courant  $I_q$  sachant que  $I_d=0$ , pour cela on obtient la relation du  $I_{sq}$  a partir de l'équation du couple (III.31) :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd})$$

On impose l'équation du flux (III.30.a) et (III.30.b) dans l'équation du couple, on aura :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot (L_d i_{sd} + M_{fd} i_f i_{sq} - L_q i_{sq} i_{sd})$$

On impose notre condition  $I_d=0$ , et on obtient :

$$C_{em}^* = \frac{3}{2} p \cdot (M_{fd} i_f i_{sq}) \quad (III.35)$$

$$\Rightarrow i_{sq}^* = \frac{2.C_{em}^*}{3.M_{fd}i_f p} \tag{III.36}$$

Les schémas blocs de la structure de commande est les suivants :

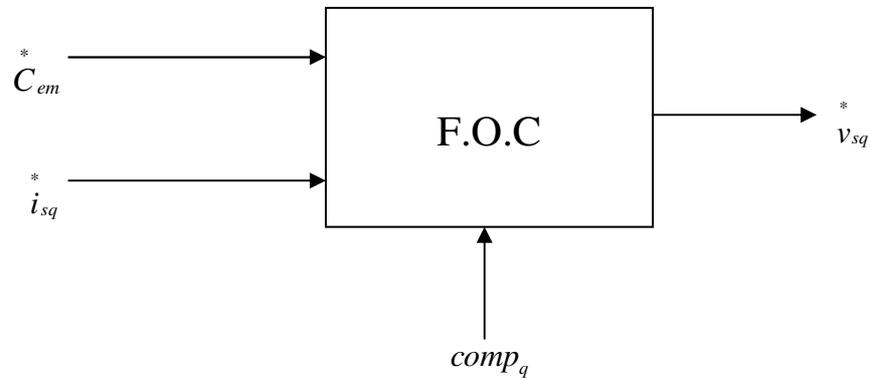


Figure III.10: Boucle de commande de la tension V<sub>q</sub>

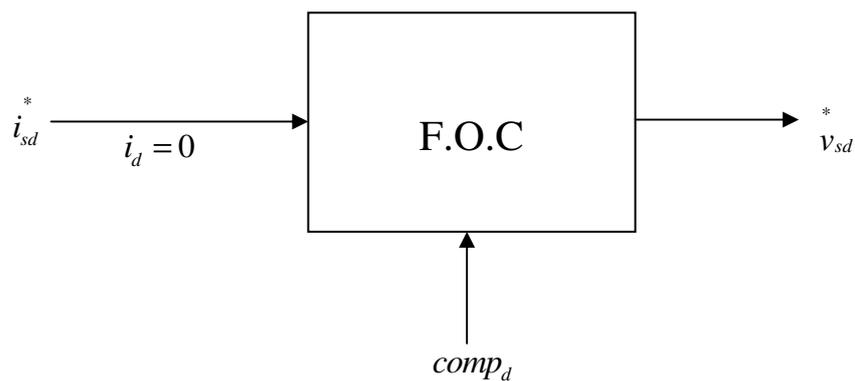


Figure III.11: Boucle de commande de la tension V<sub>d</sub>

**C. La régulation de la vitesse :**

Le régulateur de la vitesse permet de déterminer la référence de couple et de la maintenir à sa valeur de consigne. La boucle de la régulation de la vitesse est donnée par la figure (III.12).

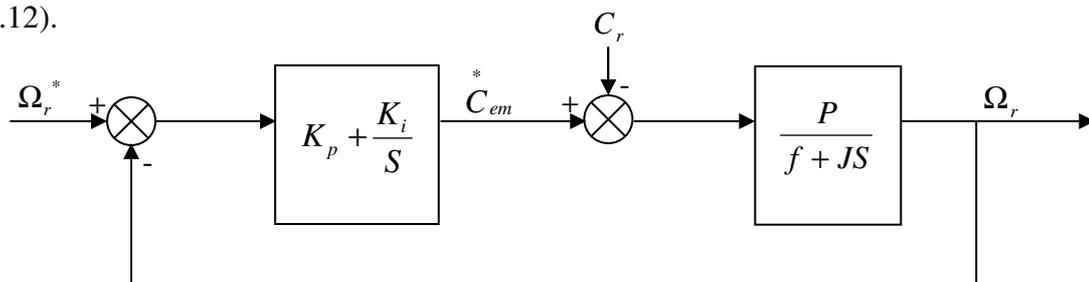


Figure III.12: Boucle de régulation de vitesse

La fonction de transfert en boucle fermée calculée à partir du schéma précédent, est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\Omega_r(s)}{\Omega_r^*(s)} = \frac{(K_p s + K_i) \frac{P}{J}}{P(s)} \quad (\text{III.37})$$

L'équation caractéristique  $P(s)$  est :

$$P(s) = s^2 + \frac{f + K_p P}{J} s + \frac{K_i P}{J} = 0 \quad (\text{III.38})$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de deuxième ordre.

En identifiant le dénominateur à la forme canonique  $(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)$ , nous avons à résoudre le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{K_i P}{J} = \omega_0^2 \\ \frac{f + K_p P}{J} = 2\xi\omega_0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_i = \frac{J\omega_0^2}{P} \\ K_p = \frac{2\xi\omega_0 J}{P} - \frac{f}{P} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

$$(\text{III.40})$$

On peut introduire maintenant le schéma bloc général utilisé pour commander notre machine :

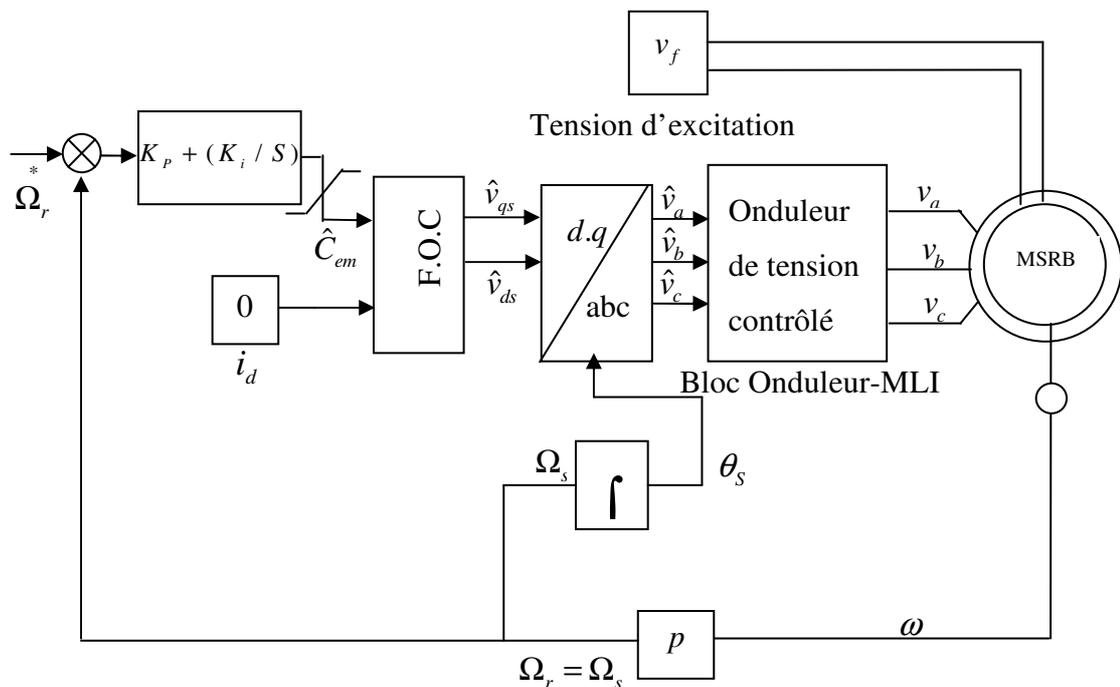


Figure III.13: Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte.

A partir de l'étude théorique de la structure de la commande vectorielle, dans ce chapitre, nous pouvons élaborer les différents blocs nécessaires à une simulation du procédé. Les figures des résultats suivantes :

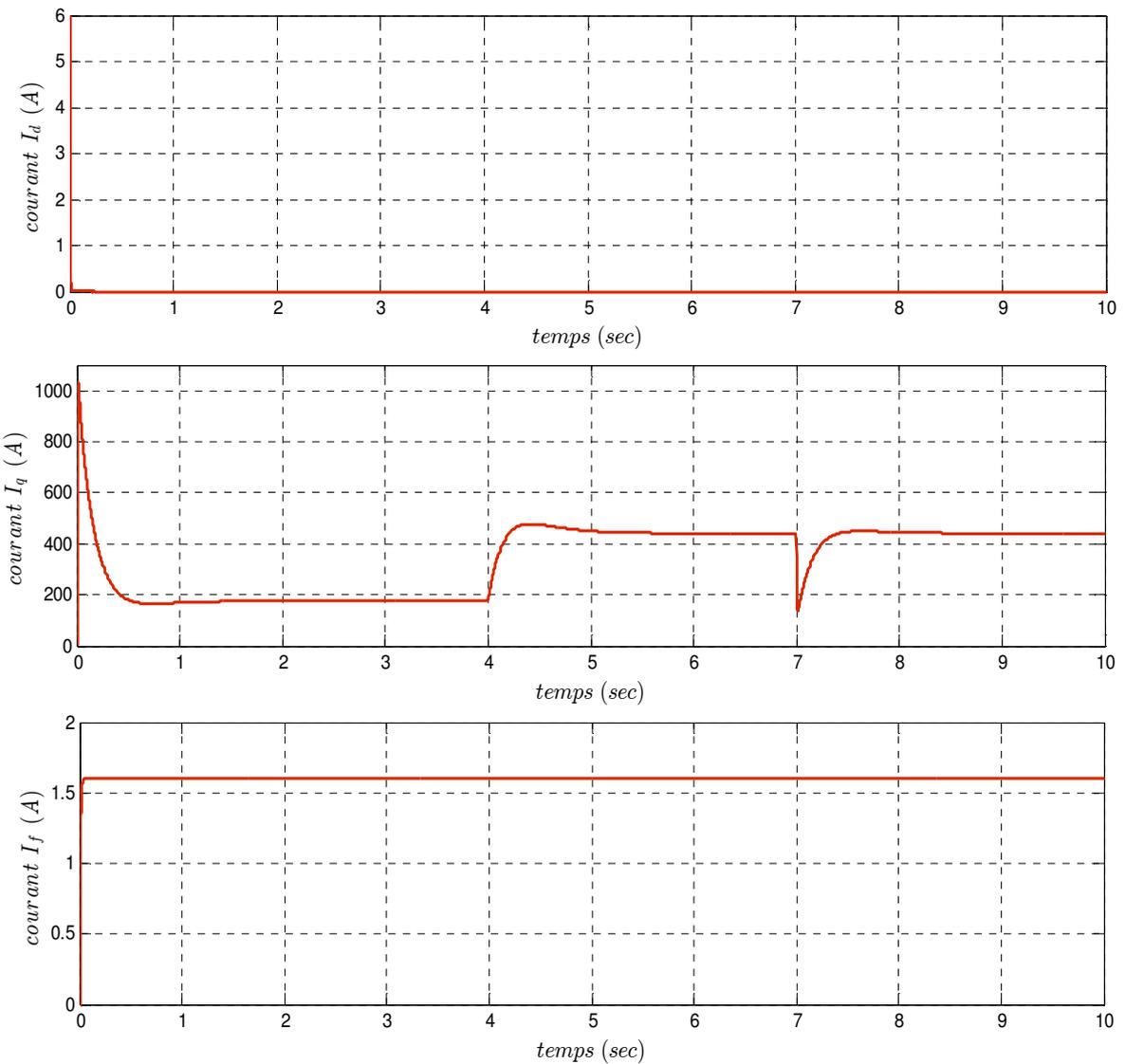


Figure III.14: les courants de sortie dans le repère mobile dq.

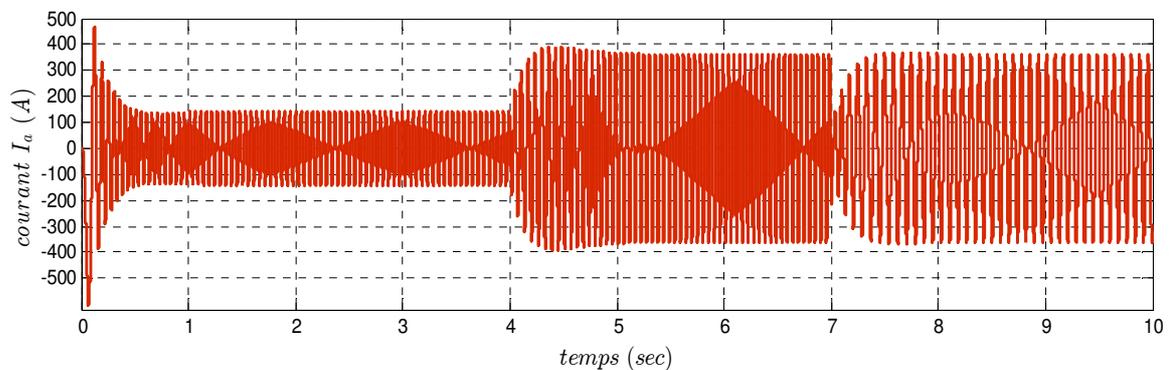


Figure III.15: les courants de sortie du phase  $I_a$ .

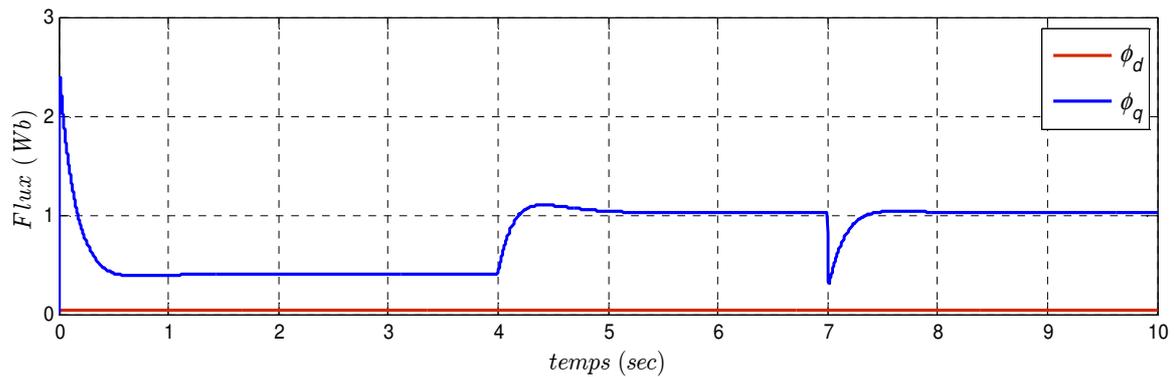


Figure III.16: les flux magnétique dans le repère mobile dq.

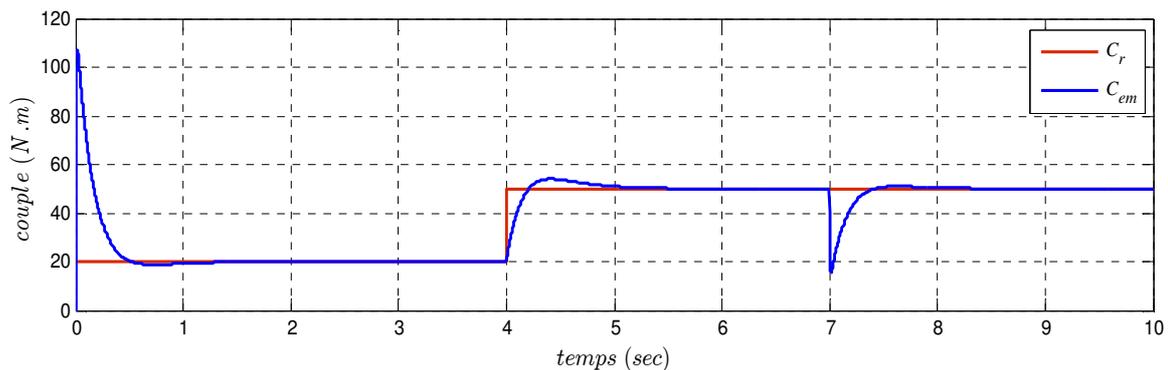


Figure III.17: comparaison entre couple résistant et le couple électromagnétique.

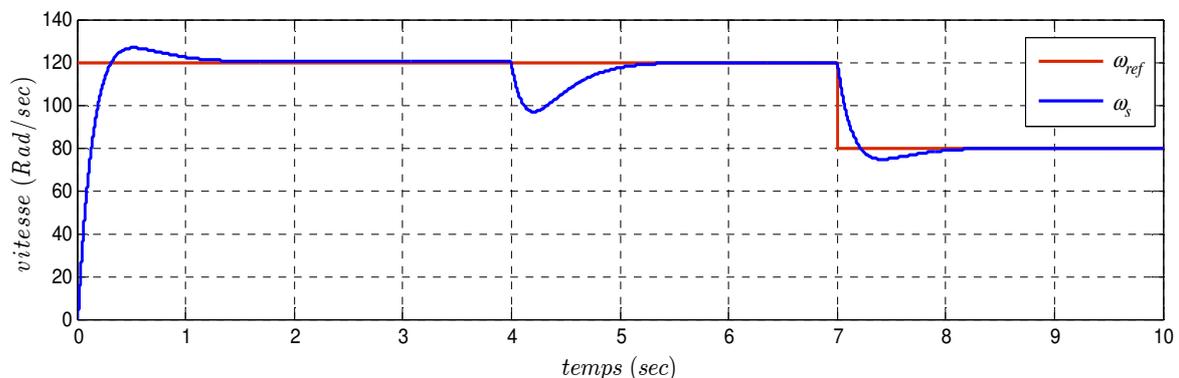


Figure III.18: comparaison entre la vitesse de référence et la vitesse du moteur.

### III.3.4 Interprétations :

La réponse des deux composantes du courant montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine, ( $i_d = 0$ ) avec le couple électromagnétique qui dépend seulement de la composante  $i_q$ .

On remarque que le système répond positivement à ce test, le couple et la vitesse suit leurs références, les deux grandeurs subit un pic lors du passage d'une référence à l'autre, puis rejoint ses valeurs de référence, le courant  $i_q$  est toujours l'image du couple ce qui justifie le découplage entre le flux et le couple.

$I_f$  est le courant qui circule dans le bobinage du rotor. Il est directement lié à la tension d'excitation  $V_f$ . Si la tension d'excitation  $V_f$  augmente, le courant d'excitation  $I_f$  a tendance à suivre cette augmentation.

#### **III.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons commandé le système de puissance d'un véhicule électrique en commençant par les convertisseurs (deux hacheurs Buck, un hacheur Buck Boost et un onduleur deux niveaux) jusqu'à le moteur. La commande vectorielle appliquée à la MSRB, cette stratégie permet le découplage entre le couple et le flux de la machine afin d'assurer une commande souple de sa vitesse.

Les régulateurs PI dépendent fortement des paramètres de la machine et des convertisseurs, ceci nécessite une identification paramétrique correcte en vue d'une régulation.

Dans le prochain chapitre, nous allons associer les éléments commandés dans ce chapitre et ceux qui ont été modélisés dans le chapitre précédent afin d'obtenir un résultat prêt à être appliqué au modèle réel.

***Chapitre IV :***  
***Association et simulation de la***  
***chaîne de traction***

**IV.1 Introduction :**

L'objectif de ce chapitre est de décrire la connexion des modèles des composants pour obtenir le modèle du système de traction. Ce dernier sera testé dans différentes conditions afin d'établir l'importance de l'intégration de certains facteurs dans la modélisation. Nous relierons alors les éléments pour compléter la chaîne de traction, mais nous n'avons choisi que les cinq éléments où nous les avons déjà modélisés dans le chapitre précédent, où, nous avons mis en place un modèle pour chaque élément du système de traction. Cela va nous permettre de simuler toute la chaîne de traction dont les paramètres des différents organes sont donnés sur les annexes 1...5. Les objectifs de notre problème est de vérifier la validité du modèle établie, mais également, de voir les performances du véhicule, c'est-à-dire, l'autonomie sur un cycle de roulage. Le challenge de ce chapitre est d'exploiter les modèles des différents éléments du système. Bien que notre modèle analytique soit assez rapide, la simulation d'un cycle ainsi que le choix du contrôle pour la machine, vont trop allonger les temps de calcul. C'est dans l'optique de réduction de ce temps que nous avons mis en place ce que nous appelons une architecture optimisée. Dans ce chapitre, nous avons donc joué sur la structure du problème en comparant différentes possibilités sur le cycle.

**IV.2 Association des éléments de la chaîne de traction :**

L'assemblage des modèles est spécifique à notre objectif de conception par optimisation pour conserver les contraintes principales tout en réduisant le temps de calcul. Nous résumons les principales hypothèses effectuées, [16], [30] :

- Les cycles de roulage sont représentés par une succession de régimes permanents ;
- Les grandeurs électriques alternatives sont considérées sinusoïdales et identiques;
- La commande dynamique est supposée bien réalisée, et permettra d'atteindre le couple demandé.

De plus, et à partir de la modélisation de la chaîne de traction que nous avons présentée dans le deuxième chapitre, on va construire un modèle global de tout le système véhicule électrique, malgré que, nous avons retiré de notre travail l'étude de beaucoup de phénomènes et d'éléments afin de simplifier l'étude (tels que l'étude du modèle thermique et l'étude du réseau de basse tension destiné aux différents accessoires...etc). La figure IV.1 récapitule les liaisons entre les modèles de la chaîne du véhicule à étudier, où la causalité n'est respectée que pour la tension batterie, tel que nous l'avons établi à la Figure II.1.

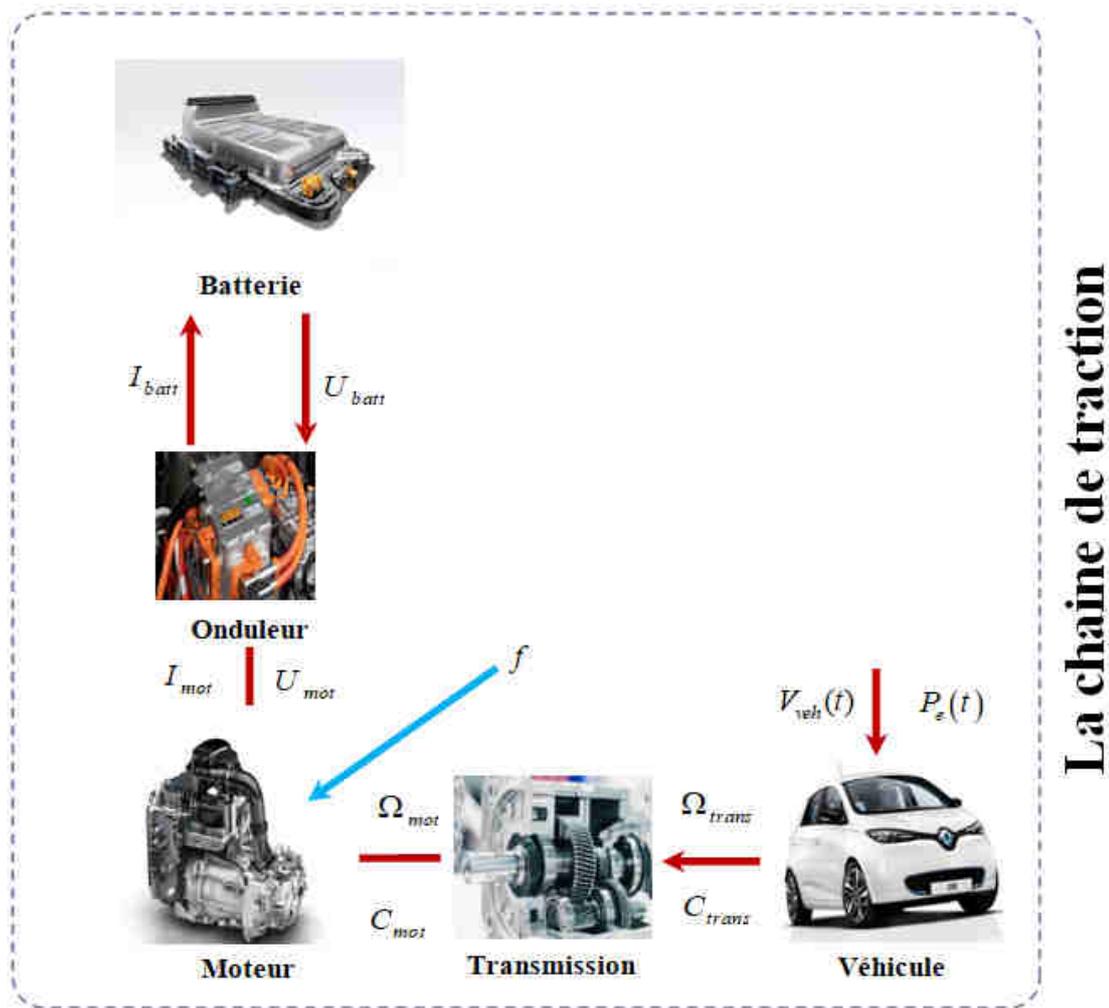
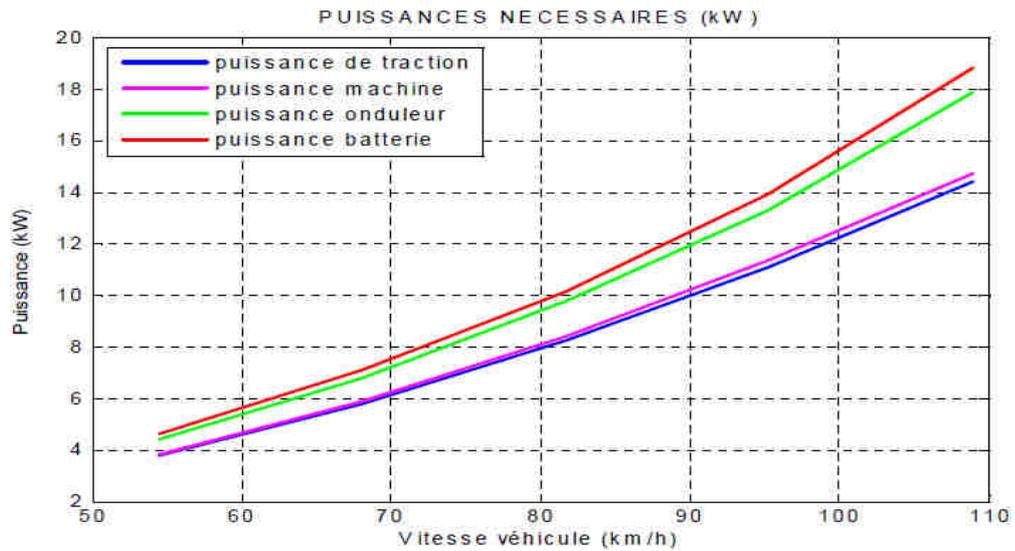


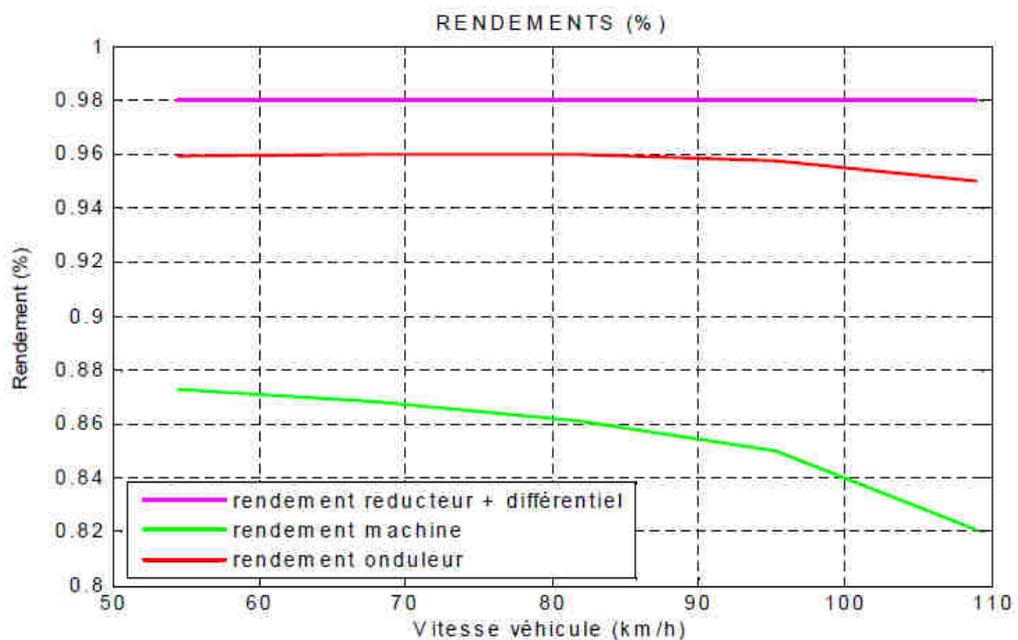
Figure IV.1: Chaîne de traction d'un véhicule électrique simplifié.

Dans une chaîne de traction d'un véhicule électrique (tels que la chaîne représentée par la figure précédente) et pour réussir d'assurer que le véhicule roule à la vitesse souhaitée, il faut confirmer et assuré que l'association des différents éléments doit être correcte et tous les éléments doivent être compatibles entre eux en termes de puissance générées. Attention, il s'agit de puissances nécessaires pour rouler à la vitesse souhaitée. A ne pas confondre avec les puissances disponibles au niveau de chaque organe, [30], [31]. Nous utilisons ensuite l'information sur la quantité d'énergie disponible dans la batterie et la corrélons à la puissance demandée à la sortie de la batterie. A titre d'exemple, nous avons tracé sur la figure IV.2 des courbes de puissances nécessaires en fonction de la vitesse du véhicule (Les paramètres utilisés correspondent à un petit véhicule Renault existant (Twizy) à titre d'exemple, [15]).



**Figure IV.2:** Puissances nécessaires au niveau des organes de la chaîne de traction en fonction de vitesse

Ces courbes nous permettent d'en déduire le rendement associé à chaque organe et ainsi d'identifier à quel niveau doivent se porter les efforts d'amélioration du rendement, [20]. Les courbes présentées sur la Figure IV.3 nous indiquent ici que c'est au niveau de la machine que l'optimisation doit être menée en priorité.



**Figure IV.3 :** Rendement des organes de la chaîne de traction à vitesse constante

Enfin il est important d'utiliser la courbe de puissance nécessaire au niveau de la batterie et la courbe d'énergie disponible en fonction de la puissance de décharge (issue du fournisseur de la batterie) pour en déduire l'autonomie du véhicule en fonction de la vitesse de roulage.

### IV.3 Autonomie de la chaîne de traction du véhicule électrique:

L'autonomie est un facteur dimensionnant dans le cas du véhicule électrique. En utilisant une batterie de capacité plus grande, on peut s'attendre à avoir une autonomie plus importante. Il faut néanmoins prendre en compte le fait que la masse totale du véhicule se voit également augmenter, ce qui augmente la consommation globale du véhicule. Il est possible de redonner les équations (II.9), (II.10), (II. 1), (II. 5), (II.6) et (II.7) du chapitre II, et à partir desquels on peu constater que la puissance demandée par le véhicule (absorbé de la batterie) augmente avec l'augmentation de la vitesse et de la masse du véhicule.

$$\Omega_{trans}(t) = \frac{1}{R_{roue}} V_{veh\_moyen} \quad (IV.1)$$

$$C_{trans}(t) = R_{trans}(t) \cdot \frac{(F_{aéro} + F_{pneu} + F_{pente} + F_{accel})}{\eta_{cardan}} \quad (IV.2)$$

$$F_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot \rho(T_{ext}) \cdot S_f \cdot C_x \cdot V_{veh\_moy}^2 \quad (IV.3)$$

$$F_{pente} = M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha(t)) = M_{veh} \cdot g \cdot pe_{moyen} \quad (IV.4)$$

$$F_{pneu} = CRR(V_{veh}) \cdot M_{veh} \cdot g \quad (IV.5)$$

$$F_{accel} = \left( M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \gamma = \left( M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \dot{V}_{veh} \quad (IV.6)$$

Où, la vitesse  $V_{veh}$  et la masse  $M_{veh}$  du véhicule intervient au niveau de la vitesse  $\Omega_{trans}(t)$  et du couple résistant  $C_{trans}(t)$ , ce dernier s'applique sur le véhicule et influe sur les efflores de résistance au roulement, d'accélération et de pente. Ce qui implique que l'autonomie du véhicule décroît ainsi fortement avec la vitesse et la masse du véhicule.

Dans un véhicule électrique et malgré que l'autonomie du véhicule décroît avec plusieurs facteurs comme nous avons déjà parlé, toute la plage de l'état de charge de la batterie est exploitée pour assurer un maximum d'autonomie. Le niveau maximal peut atteindre le 100%, cas d'une recharge complète de la batterie. Pour le niveau minimal, il s'agit souvent d'un seuil fixé entre 10% et 20% de SOC. En effet, pour éviter les décharges profondes, connues pour leur effet nuisible sur la durée de vie et la sécurité de la batterie, lorsque le

niveau minimal de SOC est atteint, le véhicule se met en arrêt pour interdire toute décharge supplémentaire.

Enfin, l'étude de l'autonomie des batteries nécessite une étude détaillée, parce que et certainement elle dépend de plusieurs autres paramètres, et dans le cadre de ce travail on ne va pas s'intéresser à ce problème, il nécessite une autre étude.

#### IV.4 Simulation du fonctionnement de la chaîne de traction :

La simulation d'un cycle de roulage permet d'estimer l'autonomie du véhicule, est ce n'est pas notre objectif principal dans notre travail, malgré que nous allons tracer l'évolution de l'état de charge de la batterie pendant le fonctionnement de la chaîne. En utilisant l'association des modèles des éléments de tout le système de traction (chaîne de traction), il est possible de simuler différents cycles de roulage et d'observer l'évolution des grandeurs en fonction du temps, mais il faut noter que la dynamique des éléments de la chaîne se divise en deux ; des systèmes rapides (généralement les systèmes électriques, machines, convertisseurs statiques comme les onduleurs et les hacheurs) et des systèmes avec dynamique non rapide (modèle du véhicule, batteries et transmission), pour cela, nous avons préféré de représenter la chaîne de traction à travers la figure simplifiée (IV.4) suivante :

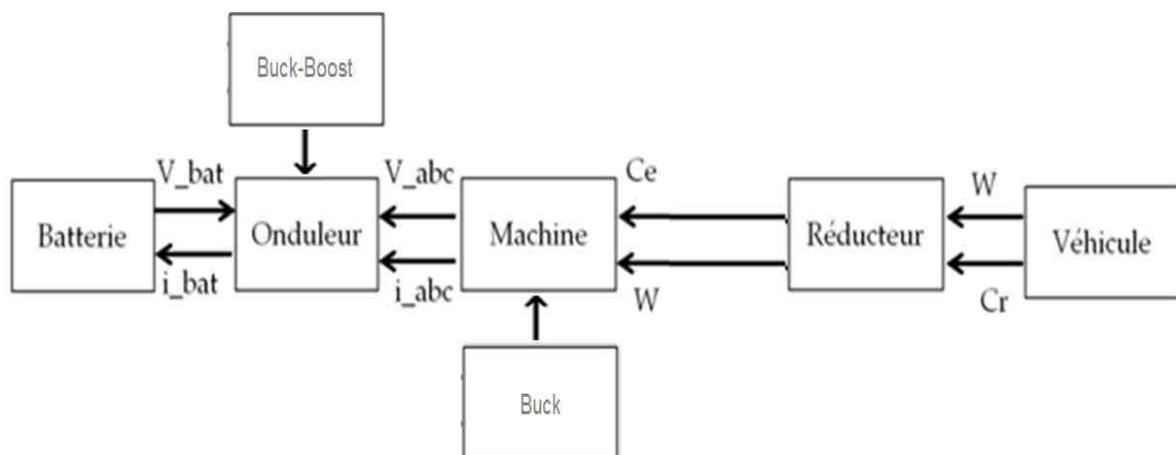


Figure IV.4: Chaîne de traction simplifiée

La simulation est effectuée et les résultats seront alors représentés en deux étapes ; dans la première étape, on va donner des résultats sur un petit intervalle de temps afin de bien visualiser les régimes transitoires des différentes grandeurs et variables, et dans la deuxième partie on va simuler tout le système de traction du véhicule selon les conditions de roulage établies.

## IV.4.1 Première étape de simulation de la chaîne de traction :

Cette première partie de simulation concerne uniquement les éléments où la dynamique de variation de ces grandeurs est rapide, cela nous oblige de faire, dans un premier lieu, représenter les résultats sur un petit intervalle de temps (25 à 30 secondes) afin de voir les régimes transitoires surtout pour la machine (pour l'onduleur les figures donnés dans le chapitre précédent sont suffisants). Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (IV.5) et (IV.6), ils montrent que pendant le régime transitoire, la vitesse du véhicule ou du moteur augmentent progressivement pour atteindre une valeur souhaité en tenant compte des conditions de roulage.

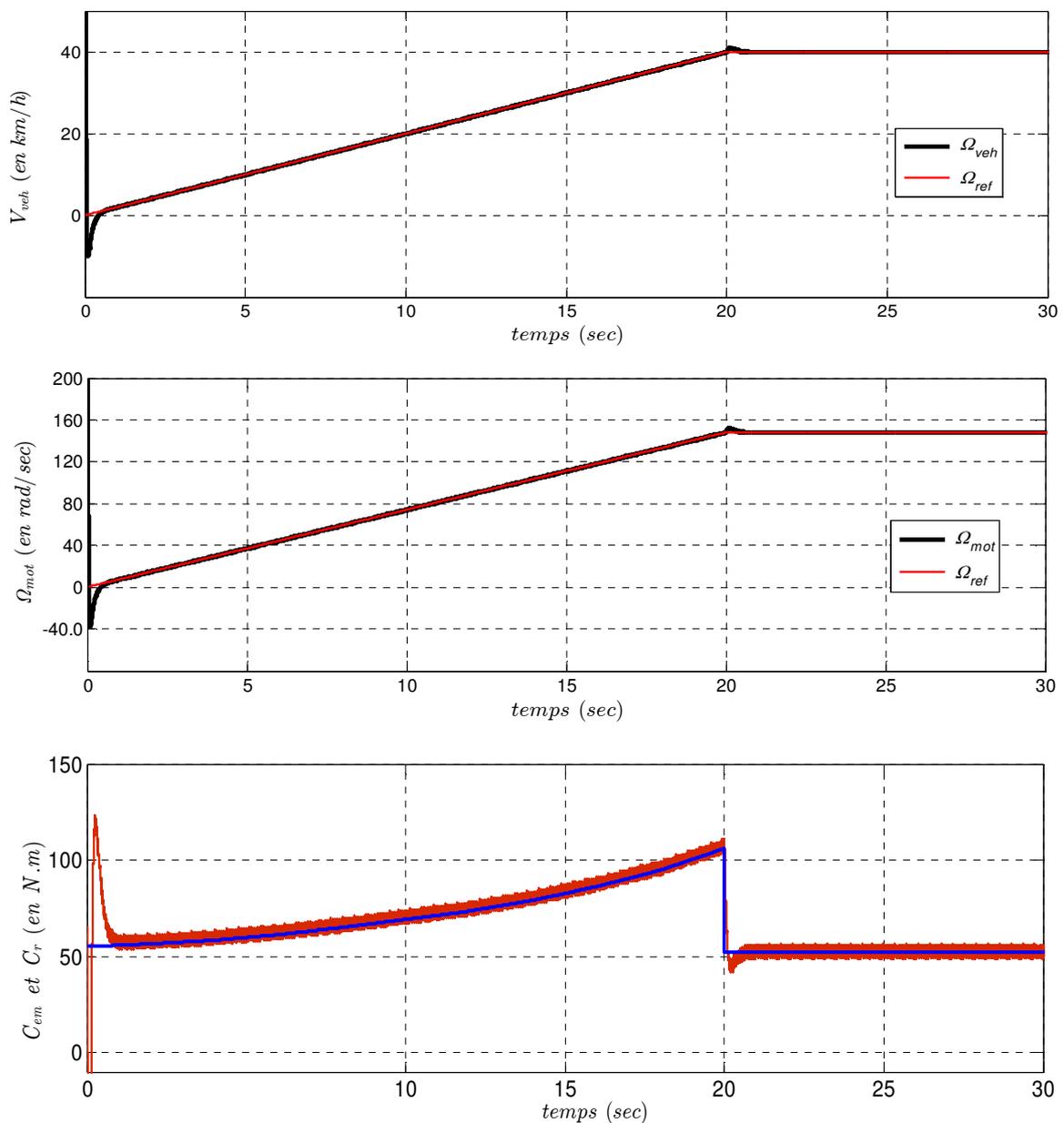


Figure IV.5 : Evolution des grandeurs mécanique de la MS

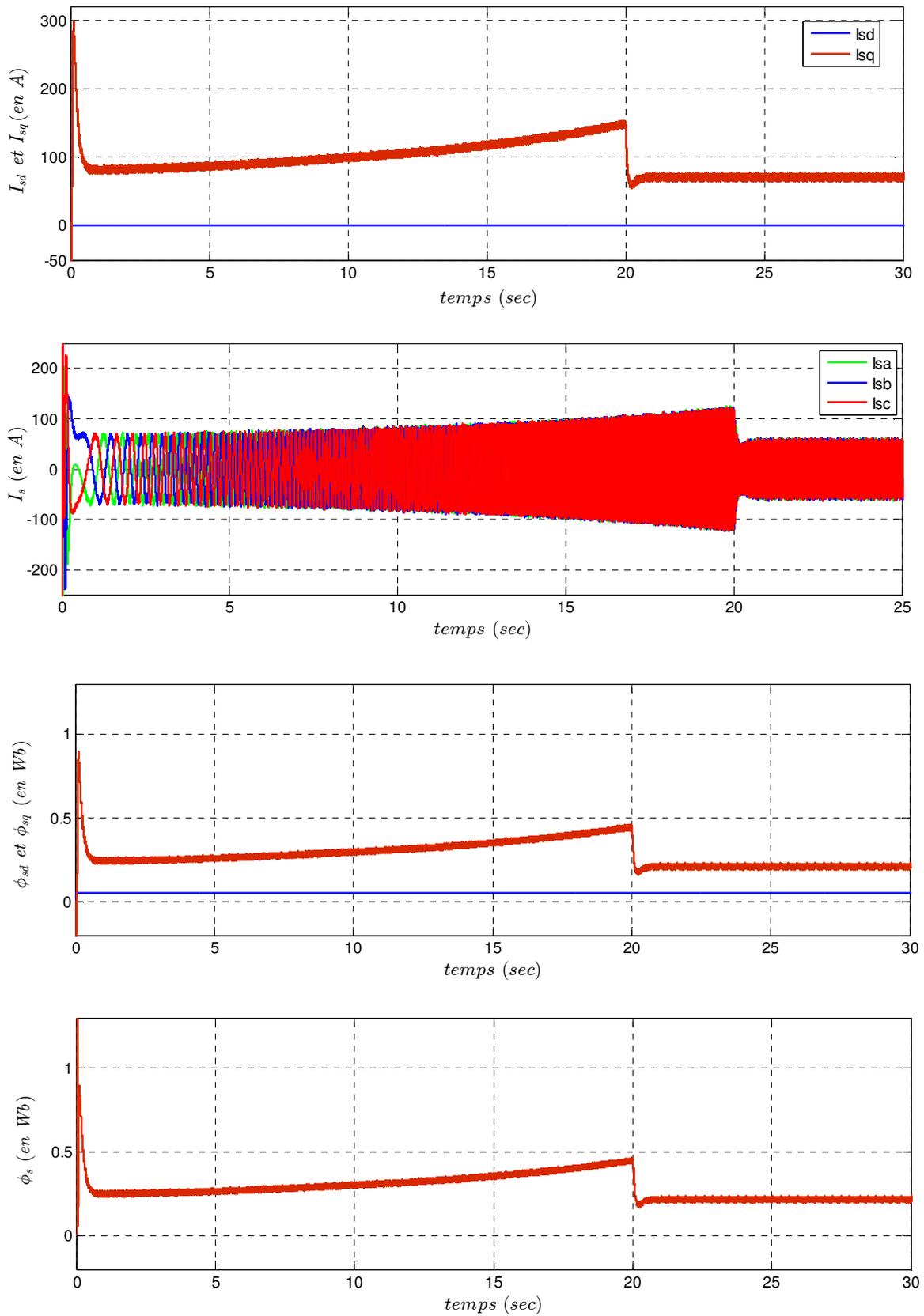


Figure IV.6: Grandeurs électromagnétiques de la machine

Les courants et le couple électromagnétique présente des fortes oscillations aux débuts, mais après, ils commencent à suivre des variations en raison de l'augmentation progressive du couple résistant jusqu'à les instants 20 seconde, ensuite, tous les variables vont prendre des valeurs constantes. Les variations de toutes les grandeurs sont fortement liées aux variations du couple résistant. A partir de la même figure (figure IV.6), on peut remarquer que les flux statoriques sont d'amplitudes variables, même chose pour le courant statorique d'une phase de la machine, tant que le couple est variable. Les résultats de simulation exhibent logiques et satisfaisants et le modèle utilisé montre très corrects. Le temps de simulation de cette première partie est très court, alors, la représentation des résultats des variations des grandeurs de la batterie devient inutile, parce que les variations de l'état de charge de la batterie  $SOC$  et la tension à la sortie de la batterie  $V_{bat}$  sont très petites.

#### IV.4.2 Deuxième étape de simulation de la chaîne de traction :

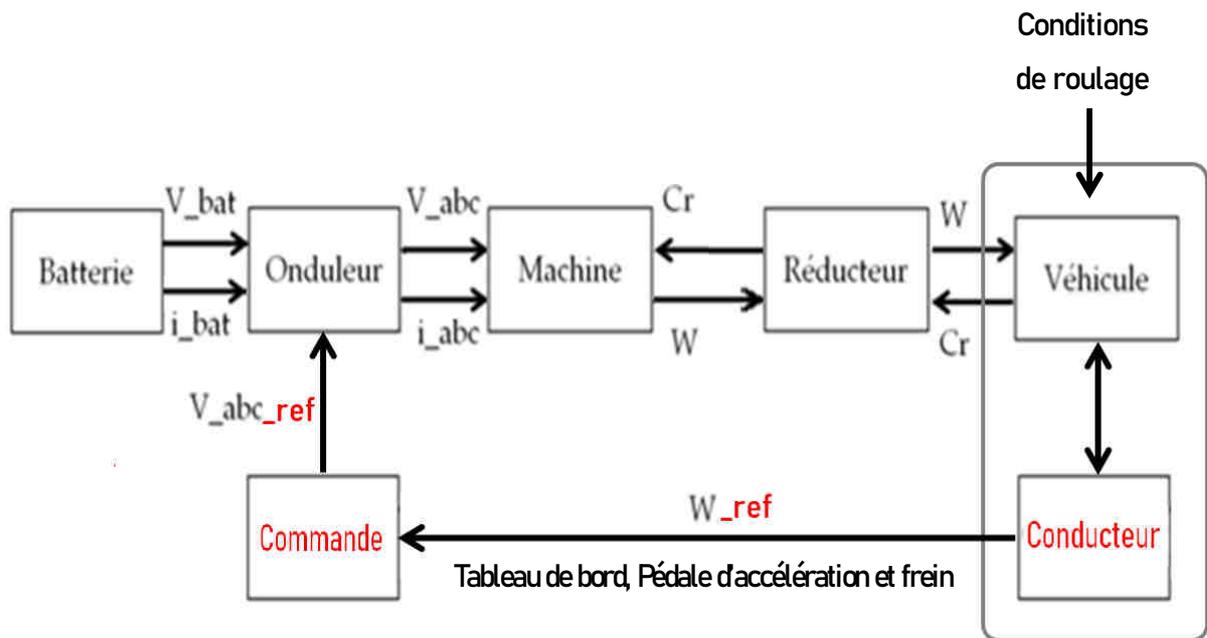
Cette partie de simulation décrit l'assemblage de tous les éléments et modèles de tout le système de traction, ici, les conditions de roulage (excepté la vitesse du véhicule  $V_{veh}$ ) et tous les éléments intervenant dans la modélisation de véhicule doivent être respectés. La figure IV.4 montre le schéma de principe simplifié selon lequel cette deuxième partie de simulation sera faite. Mais il est important de dire que la simulation est faite selon les conditions de roulage donnés au deuxième chapitre et que les résultats sont redonnés sur la figure IV.7. Les paramètres du véhicule, de la batterie, de la machine, de l'onduleur et du système de transmission sont tous donnés sur les annexes.

**Remarque importante :** Dans cette partie de simulation, nous cherchons à savoir si la chaîne de traction considérée est capable de respecter les performances demandées sans calculer les performances réellement atteintes le cas échéant. L'objectif ici n'est pas d'étudier la commande dynamique du système véhicule. Malgré cela, on peut dire que les résultats montrent satisfaisants.

Dans ce qui suit, nous allons considérer le cas où le véhicule est un système lié directement au conducteur, ils forment ensemble un système Véhicule-Conducteur faisant ensemble une partie importante de la boucle de pilotage de la chaîne de traction. De ce fait, la simulation d'un cycle de roulage complet en terme d'opération (y compris le pilotage) peut rapidement engendrer des temps de plusieurs dizaines de secondes si en intégrant la commande de la vitesse de la machine et par conséquent du véhicule, [13], [15]. Par ailleurs, l'évolution possible des modèles à l'avenir vers plus de détails est également un

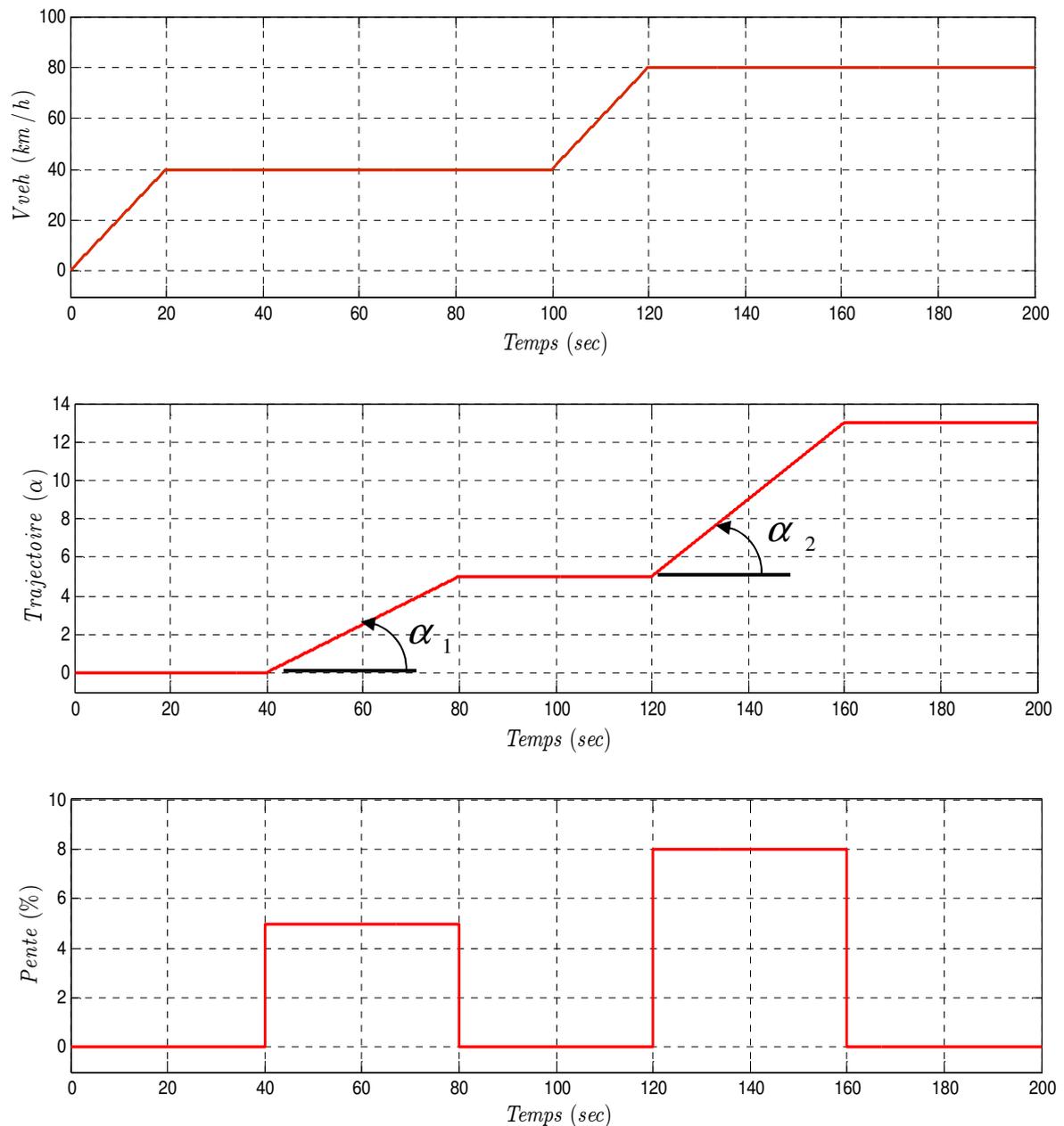
risque de forte augmentation des temps de calcul. Dans ce contexte, des stratégies ont été développées pour mettre en place des architectures meilleures pour l'optimisation afin de limiter les calculs au juste nécessaire, [30], [31].

La figure (IV.7) permettra de mettre en place une architecture globale pour commander la vitesse de la machine électrique (à travers l'onduleur) et par conséquent la vitesse du véhicule



**Figure (IV.7):** Architecture d'une chaîne de traction (avec commande et conducteur).

Avec la simulation effectuée, nous avons essayé de savoir si la chaîne de traction commandée est capable de respecter les performances. Notant que, nous avons appliqué les mêmes conditions de roulage donnés au chapitre précédent, la figure suivante donne les conditions :

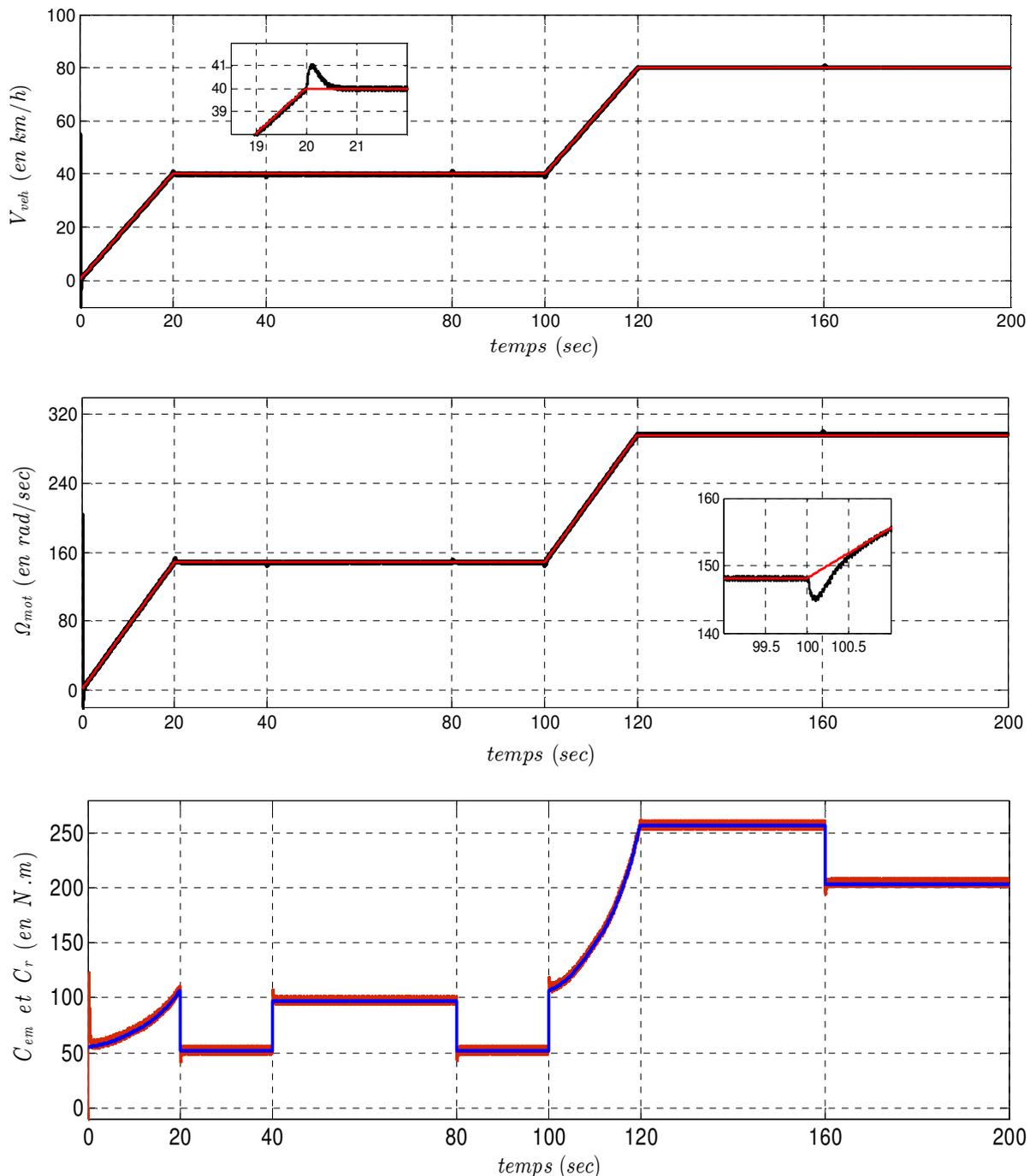


**Figure IV.8:** Conditions de roulage (Exemple)

En plus des conditions de roulage appliqués, notre cahier des charges au niveau véhicule (c'est une simulation en faite) doit comprendre des contraintes de performances qui peuvent être :

- Grimper une pente donnée à vitesse faible ;
- Réaliser une accélération ;
- Grimper une pente donnée à une vitesse maximum;
- Maintenir une vitesse maximum.

Les résultats de simulation de la chaîne de traction selon les conditions de la figure (IV.8) sont donnés sur les figures qui suivent :



**Figure IV.9:** Evolution des grandeurs mécanique de la MS

Les autres grandeurs de la machine (Courant statorique d'une phase, module de flux rotorique et flux rotorique ...etc) sont données par cette figure :

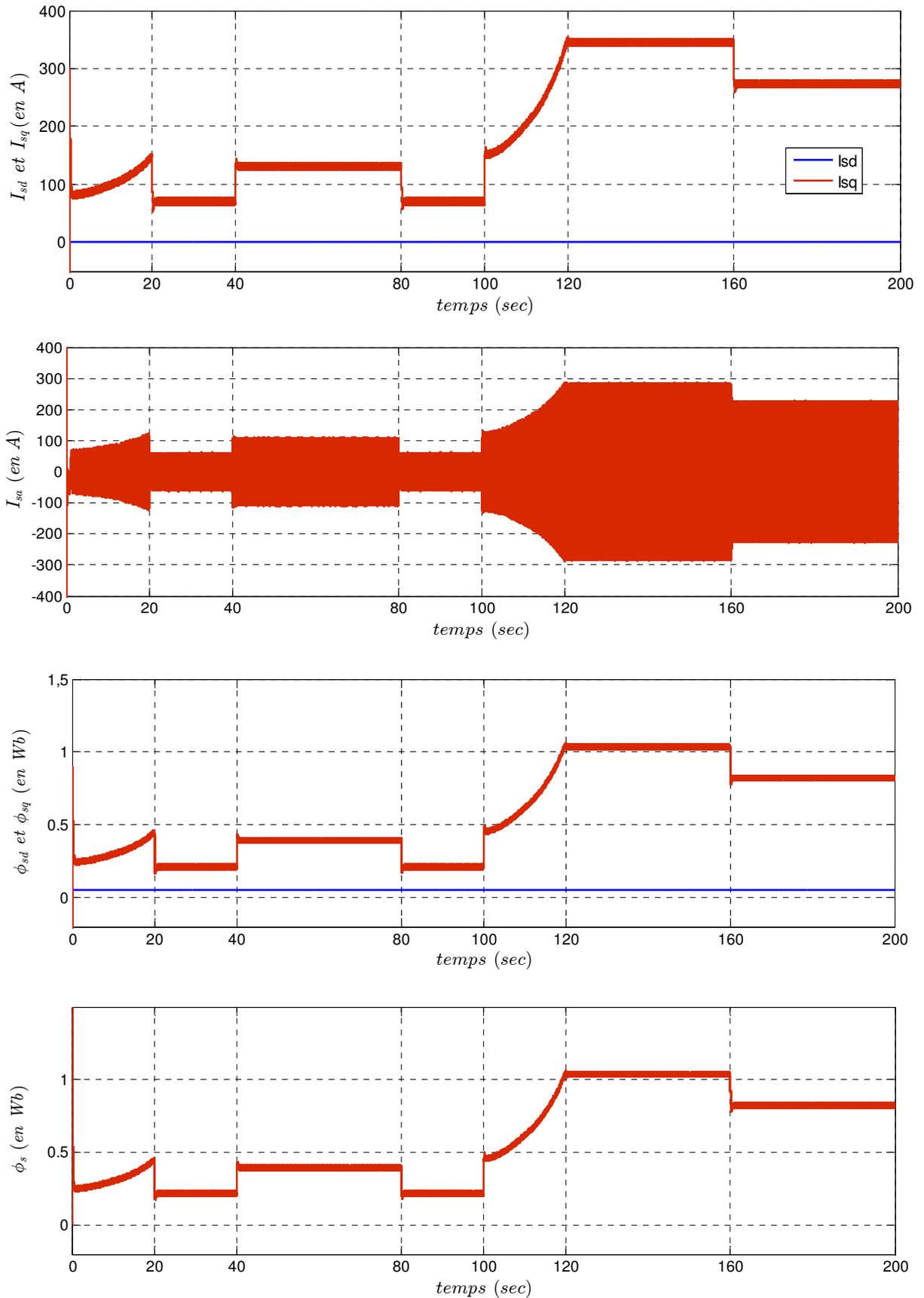
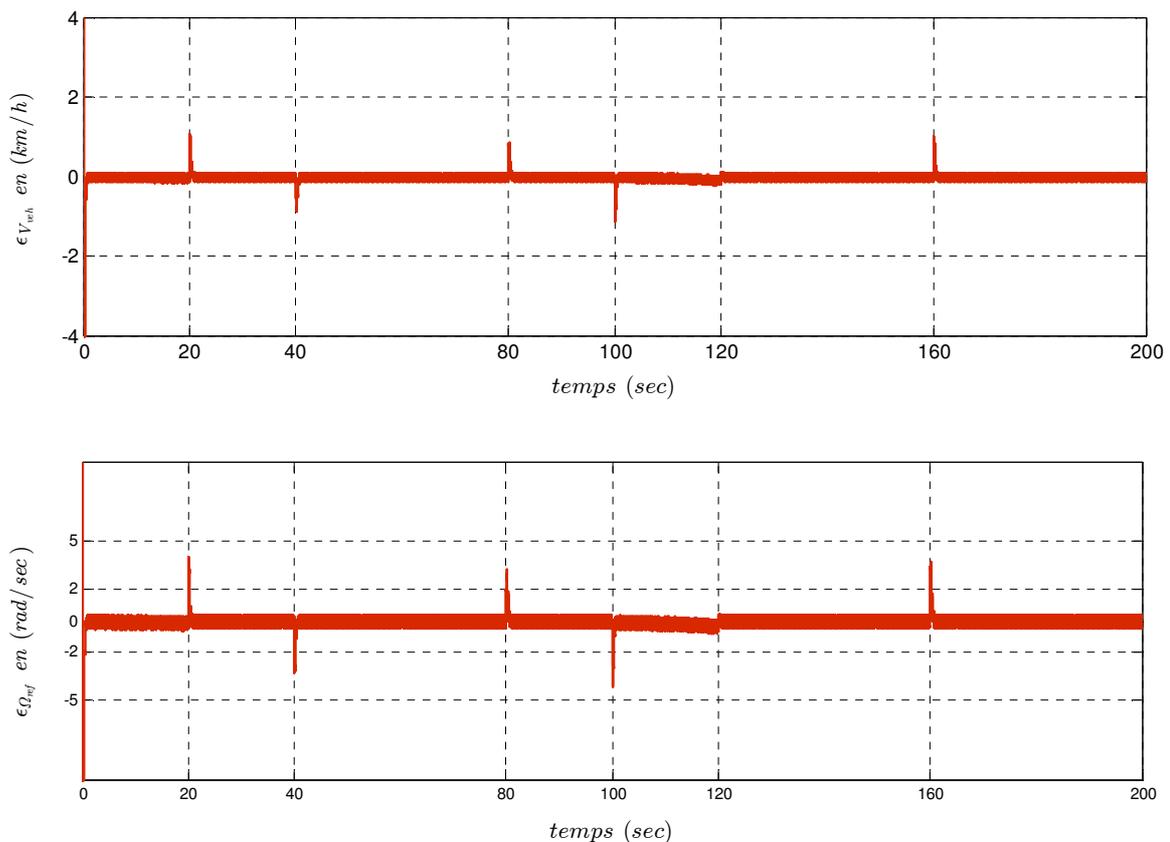


Figure IV.10: Evolution des grandeurs électromagnétiques de la machine

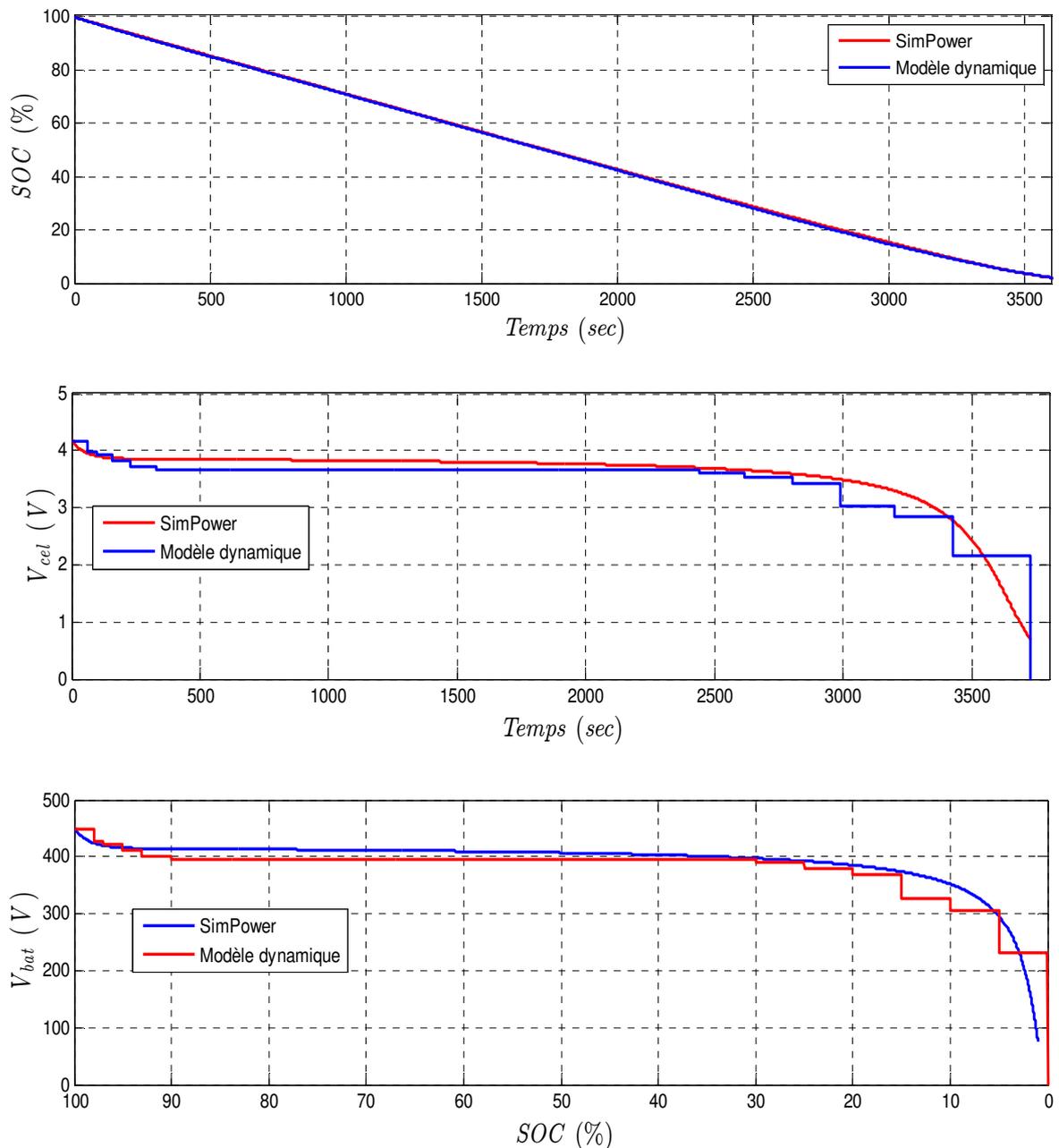
Les résultats obtenus montrent que la vitesse du véhicule suit la référence choisit (même chose pour la vitesse du moteur) par le conducteur. Pendant le roulage avec la vitesse choisit et sur la trajectoire imposée (caractérisé par deux pentes), les courants, les flux et le couple électromagnétique varient en fonction de plusieurs facteurs, tels que les conditions de roulage et le couple résistant engendrée par les différents efforts étudié en deuxième chapitre. Pour le couple électromagnétique, il essaie toujours de rejoindre la valeur du couple de charge. La figure suivante donne les erreurs commises en poursuite (zooms) pour distinguer les différences.



**Figure IV.11:** Erreurs de poursuites commises sur la vitesse de la machine et du véhicule.

Le temps de simulation de cette deuxième partie (200 secondes) est suffisant pour la représentation des résultats des variations des grandeurs de la batterie, malgré que les variations de l'état de charge de la batterie  $SOC$  et la tension à la sortie de la batterie  $V_{bat}$  sont petites. Nous avons préféré de donner la figure (IV.12) qui présente ces deux grandeurs, où nous pouvons remarquer que l'état de la batterie  $SOC$  reste excellent et que la tension de sortie (400 Volts) demandée à la batterie est largement assurée pour un temps de 200 secondes. Les paramètres de la batterie sont donnés sur l'annexe 6, où la tension de

sortie nominale est 400 Volts, le nombre de cellule est 192, avec  $m = 96$  cellules en série et  $p = 32$  branches.



**Figure IV.12:** Simulation de la décharge d’une batterie Li-ion

A partir de la figure (IV.12), on peut remarquer qu’après 200 secondes, les variations de l’état de charge de la batterie  $SOC$  et la tension à la sortie de la batterie  $V_{bat}$  sont petites. Nous pouvons remarquer que l’état de la batterie  $SOC$  baisse légèrement en fonction du temps lors de la simulation d’un cycle de roulage et que la tension de sortie (400 Volts) demandée à la batterie est largement assurée pour un temps de 200 secondes.

En fin, on peut dire que les résultats de simulation sont satisfaisants et l'association des modèles utilisés montre très correcte. Mais ce travail non exhaustif nécessite des perspectives à citer.

#### **IV.5 Conclusion :**

A travers ce chapitre, nous avons pu vérifier les hypothèses de départ. En effet, nous avons décrit l'assemblage des modèles pour former le modèle de tout le système, nous avons constaté que ce modèle de ce système global dépend de plusieurs échelles, à savoir, l'échelle temporelle électronique (onduleur), l'échelle électromagnétique (moteur), l'échelle électrique (batterie) et l'échelle mécanique (véhicule et transmission), en suite nous avons effectué une simulation globale du véhicule électrique et du système de traction qui le régit. Cette simulation a pu être effectuée avec les conditions de roulage, les paramètres et les caractéristiques établies dans les chapitres précédents. Nous avons conclu que l'influence de ces derniers peut être significative notamment pour certains paramètres. Exemple, l'influence du paramètre de pente sur la puissance et le couple que doit développer la machine électrique de traction pour vaincre le couple imposé par le véhicule et qui dépend des différentes forces appliquées sur le véhicule, ainsi, la nécessité de l'utilisation d'une loi de commande pour pouvoir piloter le véhicule, bien sûr le conducteur fait partie très important dans la boucle de commande du véhicule, il joue un double rôle ; d'actionneur et d'un capteur, il est également responsable sur la rapidité, le temps de réponse et la précision du fonctionnement de la chaîne de traction.

## Conclusion Générale

En guise de conclusion, ce projet de fin d'étude nous a permis de mettre en pratique nos compétences multidisciplinaires, acquises pendant nos deux années de master, que nous espérons ont fort bien ajouté un plus à l'université Mohammed Seddik BEN YAHIYA qui nous a proposé ce sujet.

L'objectif principal de ce projet est axé sur l'étude structurelle, la modélisation et la commande d'une chaîne de traction pour véhicule électrique. A travers ce modeste travail nous avons présenté dans un premier temps, une étude de présentation des véhicules électriques ainsi que leurs évolutions à travers l'histoire, également nous nous penchons sur la constitution des organes de traction, un choix de configuration de propulsion du véhicule électrique est présenté et est justifié.

En suite, nous avons présenté les modèles des différents éléments constituant la chaîne de traction des VEs, tels que le modèle mécanique longitudinal du véhicule, le modèle de la batterie, le modèle du système de transmission, le modèle des convertisseurs statique et enfin le modèle de l'actionneur électrique utilisé. Aussi bien, un modèle d'association des différents éléments est proposé et est étudié en détailles.

Une troisième partie a été consacré pour la commande du système de puissance qui contient les convertisseurs statique et l'actionneur électrique.

Une quatrième partie a été réservée à l'association et à la simulation des éléments de la chaîne de traction, mais aussi, nous avons présenté l'importance de la commande de la chaîne qui ne sera pas effectué sans l'introduction d'une loi de commande et d'un conducteur. Nous avons utilisé une simple loi de commande, il s'agit d'une commande scalaire. Après avoir présenté plusieurs schémas d'associations, nous avons effectué plusieurs simulations pour montrer la validité des modèles étudiés et arriver à quelques discussions et conclusions. Les objectifs de notre problème est de vérifier la validité du modèle établie, mais également, de voir les performances du véhicule, c'est-à-dire, l'autonomie sur un cycle de roulage. Le challenge de ce chapitre est d'exploiter les modèles des différents éléments du système. Bien que notre modèle analytique soit assez rapide, la simulation d'un cycle ainsi que le choix du contrôle pour la machine, vont trop allonger les temps de calcul. C'est dans l'optique de réduction de ce temps que nous avons mis en place ce que nous appelons une architecture optimisée. Dans ce chapitre, nous

avons donc joué sur la structure du problème en comparant différentes possibilités sur le cycle.

Les résultats de ce travail étant convaincants, le projet est applicable sur les machines électriques dominantes dans le milieu industriel. Et c'est ainsi que nous avons vécu une expérience très pertinente et multidisciplinaire dans le domaine de l'électromécanique et l'électrotechnique (la commande, l'électronique de puissance, la mécanique, les machines électriques ... etc), cette vision globale qui nous a apporté cette expérience sera sans aucun doute un atout dans nos futures expériences professionnelles. Comme perspectives, il est important de dire qu'ils restent beaucoup d'étude à faire pour compléter ce travail. Le plus important c'est de faire réintégrer le convertisseur AC/DC que nous avons exclu de notre travail, malgré son importance dans les véhicules électriques, de plus, le transformateur DC/DC ou bien ce que l'on appelle l'isolation galvanique d'où nous n'avons pas cité malgré son importance envers la sécurité des personnes. Une autre chose importante, c'est l'étude de modélisation approfondie de la batterie et de son autonomie qui reste dépendante de beaucoup de facteurs. Afin de clore ces perspectives, nous devons revenir à la modélisation du VE, parce que nous avons ignoré l'effet thermique qui affecte les machines électriques, les convertisseurs électriques, les batteries ... etc. Donc à notre modeste avis, ce n'est pas bon de l'ignorer.

## Références Bibliographiques

- [1] C. Espanet. « *Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée Application au moteur-roue* ». [En ligne], Besançon : Université de Franche-Comté Thèse de doctorat, Janvier 1999, Format PDF. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00565544> (Consulté le 15/03/2023).
- [2] Massimo, Guarnieri. « Looking Back to Electric Cars». *In Third IEEE History of Electro-technology Conference (HISTELCON)*, Pavia, Italy, 2-3p, Volume, Septembre 2012, ISBN Electronique: 978-1-4673-3078-7
- [3] C. C. Chan, « The rise & fall of electric vehicles in 1828-1930, in Proceedings of the IEEE, Vol. 101, DOI: 10.1109/JPROC.2012.2228370, No. 1, pp. 206-212, Jan. 2013.
- [4] H.BENARIBA. « *Contribution à la commande d'un véhicule électrique* ». [En ligne], Tlemcen : Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, decembre 2018, 195p. Format PDF. Disponible sur : [https://lat.univ-tlemcen.dz/dl/benariba\\_2018.pdf](https://lat.univ-tlemcen.dz/dl/benariba_2018.pdf) (Consulté le 20/03/2023).
- [5] L. HIRSINGER, B. MULTON, «Problème de la motorisation d'un véhicule électrique» - Première partie, La revue 3E.I, N°4, décembre 1995, pp. 53-64. <https://hal.science/hal-00673996>.
- [6] C.SABER. « *Analyse et optimisation de la CEM conduite d'un chargeur de batteries embarqué dans un véhicule électrique* ». [En ligne], Génie électrique. Paris : Université Paris-Saclay, 2017, 322p. <https://theses.hal.science/tel-01646796>
- [7] J.GOODSTEIN. «Godfather of the Hybrid». *Hybrid car* [en ligne]. (2004). 68, 3, 22-23. <https://calteches.library.caltech.edu/4118/1/Hybrid.pdf>. (15/03/2023).
- [8] T.GAUDIAUT. « Voitures électriques : les constructeurs chinois montent en puissance » [en ligne]. (Modifier le 04/01/2023) Disponible sur : <https://fr.statista.com/infographie/26563/parts-de-marche-des-constructeurs-de-vehicules-electriques-dans-le-monde/> (20/03/2023).

- [9] F.MUNOZ. « H1 2022: Europe by Segments », [en ligne]. (Modifier le 11/08/2022) Disponible sur : <https://www.jato.com/h1-2022-europe-by-segments/> (21/03/2023).
- [10] S.KERMANI. « *Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel* ». [En ligne], Automatique. VALENCIENNES : Université de VALENCIENNES et du HAINAUT CAMBRÉSIS, 2009, 231p. disponible sur <https://theses.hal.science/tel-00422268>. (10/03/2023).
- [11] S. DELPRAT. « Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles ». [En ligne], Automatique. Valenciennes : Université de Valenciennes et du Hainut CAMBRÉSIS, 2002, 167p. disponible sur <https://theses.hal.science/tel-00007966>. (10/03/2023).
- [12] D.BENOUDJIT. « *Contribution a l'optimisation et à la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique* ». [En ligne], Génie électrique. Batna: Université de Batna, 2005, 85p Disponible sur : [http://theses.univ-batna.dz/index.php/theses-en-ligne/doc\\_download/3771-contribution-a-loptimisation-et-a-la-commande-dun-systeme-de-propulsion](http://theses.univ-batna.dz/index.php/theses-en-ligne/doc_download/3771-contribution-a-loptimisation-et-a-la-commande-dun-systeme-de-propulsion), (23/03/2023).
- [13] A.DUBRAY. « *Adaptation des lois de gestion d'énergie des véhicules hybrides suivant le profil de mission suivi* ». [En ligne], Automatique, Grenoble : Institut Polytechnique de Grenoble, 2002,190p, disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00411430/document>. (23/03/2023).
- [14] A.NOUH. « *Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers* ». [En ligne], Génie électrique, Belfort : Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008,207p, disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/339129978\\_CONTRIBUTION\\_AU\\_DEVELOPPEMENT\\_D'UN\\_SIMULATEUR\\_POUR\\_LES\\_VEHCULES\\_ELECTRIQUES\\_ROUTIERS](https://www.researchgate.net/publication/339129978_CONTRIBUTION_AU_DEVELOPPEMENT_D'UN_SIMULATEUR_POUR_LES_VEHCULES_ELECTRIQUES_ROUTIERS). (25/03/2023).
- [15] G.HENNI, « Modélisation et Commande d'un véhicule électrique hybride », [En ligne], Electrotechnique, Chlef : Université Hassiba BEN BOUALI de Chlef, 2015, 128p, disponible sur : <http://dspace.univ-chlef.dz/handle/123456789/776>. (25/03/2023).

[16] P.CAILLARD, « *Conception par optimisation d'une chaîne de traction électrique et de son contrôle par modélisation multi-physique* », [En ligne], Génie électrique, Lille, Ecole centrale de Lille, 2015, 192p, disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-01284821> (05/03/2023).

[18] B.SARRAZIN, « *Optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique* », [En ligne], Génie électrique, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 2012, disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00808946/document> (01/06/2023).

[19] G.MALLOY, M.LACHAPELLE, « *Essence, hybride ou électrique : ce qu'il faut savoir*, Association Canadienne des Automobilistes.

[20] N.JANIAUD, « *Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l'optimisation de l'autonomie, des performances et des couts associant* » [En ligne], Physique, Paris, Supélec, 2011, 192p, disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00660749/> (05/03/2023).

[21] S.NASRI « *étude et simulation d'un hacheur buck-boost* », mémoire, Annaba, 2021

[22] Katerina E. Aifantis, Stephen A. Hackney. « *High Energy Density Lithium Batteries* » [en ligne]. Weinheim, 266p, ISBN: **978-3-527-32407-1**

[23] F.MEHAZZEM. « *Contribution à la Commande d'un Moteur Asynchrone destiné à la Traction électrique* ». Thèse de doctorat, École Doctorale ICMS. 2010, Disponible sur : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00597698/document>

[24] R.MOSDALE., (2003), *transport Électrique Routier-Batteries pour Véhicule Électrique*. Technique d'ingénieur, Traité Génie Électrique, D566

[25] K.HOUACINE. « *La commande neuro-floue d'une machine asynchrone dans une chaîne de propulsion d'un véhicule électrique* ». Thèse de doctorat, Tizi Ouzou, UMMTO, 2016, 144p. Disponible sur : <https://www.ummt0.dz/dspace/bitstream/handle/ummt0/1232/Houacine%20Karima.pdf?sequence=1>

- [26] S.R.SALKUTI, « Electrochemical batteries for smart grid applications », article. Vol. 11, No. 3, June 2021, pp. 1849~1856. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/352031169\\_Electrochemical\\_batteries\\_for\\_smart\\_grid\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/352031169_Electrochemical_batteries_for_smart_grid_applications)
- [27] A.RAIZ, M.R.SARKER. « Review on Comparison of Different Energy Storage Technologies Used in Micro-Energy Harvesting, WSNs, Low-Cost Microelectronic Devices: Challenges and Recommendations», 2021, 33p. Disponible sur : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/5041>
- [28] V.MESTER, « Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique », Thèse de doctorat, Ecole central de Lille, Mai 2007, 207p. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00160666/document>
- [29] F.KHOUCHA, K.MAROUANI, K.ALIOUANE. and A. KHELOUI., « *Experimental performance analysis of adaptive flux and speed observers for direct torque control of sensorless induction machine drives* », IEEE PESC'04, vol. 4, November 2004.
- [30] Nicolas ALLALI, « *Convertisseur haut rendement à dimensionnement réduit pour batterie hybridée puissance/énergie de véhicule électrique : Principe de source de courant contrôlée* ». Thèse de doctorat“, École doctorale SPI (Ecole Centrale de Lille).
- [31] L.BOULON, « *Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie.*».“ *Mémoire de master* “, Université de Franche-Comté

## Annexe 1

### Paramètre physique du véhicule

Paramètres	Symboles	Valeurs
Section frontale du véhicule	$S_f$	1,562*1,787
Coefficient de pénétration dans l'air	$C_x$	0.75
Masse volumique de l'air	$\rho$	1.292
Masse totale du véhicule	$M_{veh\_tot}$	1836 Kg
Masse du véhicule à vide	$M_{veh\_vide}$	1380 Kg
Masse de la batterie	$M_{batt}$	300 Kg
Coefficient de résistance au roulement	$CRR$	0.0015
rayon de la roue	$R_{roue}$	30 cm
Rendement des joints de cardan	$\eta_{cardan}$	0.99

## Annexe 2

### Paramètre du Système de transmission

Paramètres	Symboles	Valeurs
Nombre des dents du pignon primaire	$N_{pp}$	22
Nombre des dents de l'engrenage secondaire	$N_{es}$	66
Nombre des dents du pignon secondaire	$N_{ps}$	55
Nombre des dents du block différentiel	$N_{bd}$	75
Nombre d'étages de réduction	$n$	2
Rendement des joints de cardan	$\eta_{cardan}$	0.99

## Annexe 3

### Paramètre de la Machine électrique

Paramètres	Symboles	Valeurs
Résistance de stator	$R_s$	0.58 $\Omega$
Inductance mutuelle maximale entre un circuit statorique et un circuit rotorique	$M_f$	0.0236 H
Inductance d'axe quadratile	$L_q$	0.0231 H
Inductance d'axe direct	$L_d$	0.0231 H
Inductance du circuit inducteur	$L_f$	0.924 H
Moment d'inertie	$J$	0.2 N.m
Nombre de paire de pole	$p$	2
Coefficient de frottement	$f_{vis}$	0,00
Tension d'alimentation	$V_s$	220V
Résistance du circuit inducteur	$R_f$	125 $\Omega$
Tension d'excitation du rotor	$V_f$	220v DC

## Annexe 4

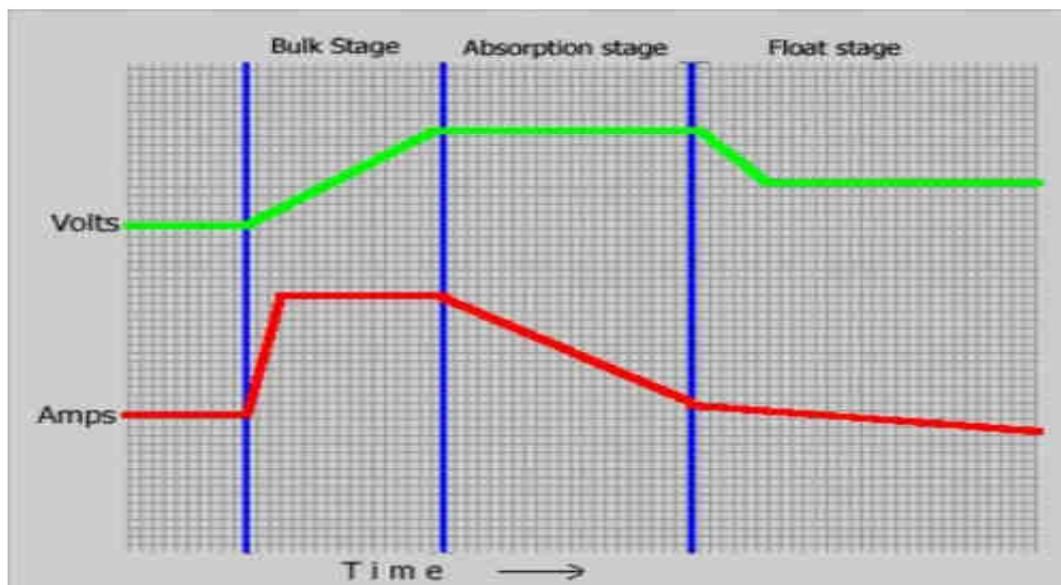
### Paramètre de l'onduleur

Paramètres	Symboles	Valeurs
L'indice de modulation	$m$	20
Le taux de modulation	$r$	0.8
la fréquence de la porteuse	$f_p$	2000
la tension de référence	$f_m$	50
Amplitude du signal sinusoïdale	$V_a$	220
Amplitude du signal de porteuse	$V_p$	1

## Annexe 5

### Paramètre de la batterie utilisée (Lithium-Ion)

Paramètres	Symboles	Valeurs
la tension d'une cellule	$V_{cel}$	4.16
La tension d'un pack (batterie)	$V_{pac}$	400
nombre de branches	$p$	12
nombre de cellules par branche	$m$	16
Nombre total de cellules	$n = m.p$	192
Masse de la batterie	$M_{batt}$	300 Kg



**Figure III :** La relation entre le courant et la tension les trois phases du cycle de charge [1].

## Annexe 6

### La méthode de Ziegler Nichols :

La méthode de Ziegler-Nichols est une approche couramment utilisée pour estimer les paramètres d'un régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) à l'aide de la réponse indicielle du système. Voici les étapes de base de la méthode de Ziegler-Nichols pour estimer les paramètres d'un régulateur PID.

On Réalise une boucle fermée avec un contrôleur P (proportionnel) uniquement. On Fixe la valeur de la constante de temps intégrale ( $T_i$ ) et de la constante de temps dérivée ( $T_d$ ) à zéro.

On Augmente progressivement le gain proportionnel ( $K_p = K_m$ ) du régulateur jusqu'à ce que le système commence à osciller de manière stable.

On Mesure la période de l'oscillation stable ( $T_U$ ) du système. La période  $T_U$  est le temps requis pour qu'un cycle complet d'oscillation se produise.

À la fin, on Utilise les valeurs de  $K_m$  et  $T_U$  pour estimer les paramètres du régulateur PID selon les règles de Ziegler-Nichols à l'aide du tableau suivant :

**Tableau III.1** : Tableau du Ziegler-Nichols

Type de contrôle	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
PID classique	$0.6K_m$	$\frac{T_U}{2}$	$\frac{T_U}{8}$
P	$0.5K_m$	-	-
PI	$0.45K_m$	$\frac{T_U}{1.2}$	-
PD	$0.8K_m$	-	$\frac{T_U}{8}$