

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. Mira-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département
Génie Electrique

MEMOIRE
EN VU DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

Domaine : Sciences et technologie, Filière : Electronique
Spécialité : Instrumentation

Thème

Contribution à l'étude et simulation d'une chaine de conversion pour
Véhicule Electrique

Présenté par :
Mr. Mayas Benadjaoud
Mr. Lounes Yahiaoui

Encadré par : Mr. Charikh Ahmed

Soutenu publiquement le 09 juillet 2019 devant le jury composé de :

Mr. Sadjji Mustapha
Mr. Tafinine Farid

Année universitaire: 2018/2019

« Pour un monde durable mieux vaut qu'il soit vert »



Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur, Monsieur Charikh Ahmed, Professeur à l'université de Bejaia, pour son soutien, sur tout à sa disponibilité tout au long du semestre. Et ainsi les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie particulièrement mes parents, qui m'ont soutenu durant ces cinq années d'études et qui m'ont toujours encouragé dans la poursuite de mes études espérant qu'un jour me voir réussir.

« Ma mère grâce à ses bénédictions de tous les jours, et qui a toujours cru en moi ».

Mes sincères remerciements à :

Monsieur Sadjji Mustapha, mon enseignant en deuxième et quatrième année, un comportement exemplaire vous resteriez pour moi toujours un souvenir de l'université.

A madame Ghennam Souhila, qui m'a encadré dans mon projet de fin cycle.

Monsieur Haroune Aouzellag, docteur à l'université de Boumerdes qui nous a beaucoup aidés dans notre travail.

Je te serai pour toujours reconnaissant à toi NANA, pour tes conseils et ton sens d'orientation.

Et en fin je tiens à remercier tous mes amis, toute personne qui se préoccupait de moi et de ma soutenance comme étant la sienne, et en fin à toi lecteur.

Mayas Benadjacud

Remerciement

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur, Monsieur Charikh Ahmed, Professeur à l'université de Bejaia, pour son soutien, sur tout à sa disponibilité tout au long du semestre. Et ainsi les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie particulièrement mes parents, qui m'ont soutenu durant ces cinq années d'études et qui m'ont toujours encouragé dans la poursuite de mes études espérant qu'un jour me voir réussir.

« Ma mère grâce à ses bénédictions de tous les jours, et qui a toujours cru en moi ».

Mes sincères remerciements à :

Monsieur Sadjji Mustapha, mon enseignant en deuxième et quatrième année, un comportement exemplaire vous resteriez pour moi toujours un souvenir de l'université.

A madame Ghennam Souhila, qui m'a encadré dans mon projet de fin cycle.

Monsieur Haroune Aouzellag, docteur à l'université de Boumerdes qui nous a beaucoup aidés dans notre travail.

Je te serai pour toujours reconnaissant à toi NANA, pour tes conseils et ton sens d'orientation.

Et en fin je tiens à remercier tous mes amis, toute personne qui se préoccupait de moi et de ma soutenance comme étant la sienne, et en fin à toi lecteur.

Mayas Benadjaoud

Table des matières

Remerciements	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	III
Liste des nomenclatures	IV
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Historique et généralité du véhicule à traction électrique

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique de véhicule électrique	3
I.3 Définition du véhicule à traction électrique	5
I.4 Problématique du véhicule à traction électrique	6
I.5 Actualité Sur le véhicule électrique	7
I.6 Présentation de véhicule électrique.....	8
I.6.1 Fonctionnement	8
I.6.2 Description de la chaîne de traction électrique	9
I.6.2.1 Motorisation des voitures électrique	10
I.6.2.1.a Les machines à courant continue (MCC)	10
I.6.2.1.b Avantage et Inconvénients des machine à courant continu.....	11
I.6.2.1.c Les machines asynchrones (MAS)	12
I.6.2.1.d Les machines synchrones	12
I.6.2.1.e La différence entre ces deux machines électriques (MS et MAS)	13
I.6.2.2 Convertisseur statique	13
I.6.2.3 Source d'énergie embarquée.....	14
I.7 Avantages et inconvénients du VE	14
I.7.1 Avantages.....	14
I.7.2 Inconvénients	15
I.8 Conclusion	16

Chapitre II : Système de recharge du véhicule électrique

II.1 Introduction	17
II.2 Les batteries des véhicules électriques	17
II.2.1 Fonctionnement	17
II.2.2 Caractéristiques des batteries.....	18
II.2.3 Principaux types de batteries	19
II.2.4 Pack de batterie de VE.....	22

Table des matières

II.2.5 L'hybridation dans les stockeurs	23
II.2.6 Détermination de l'état de charge de la batterie (SOC)	23
II.2.7 Mécanisme de dégradation des batteries lithium-ion	24
II.3 Le chargeur de batterie	24
II.3.1 Les moyens de recharge	24
II.3.1.1 La borne	24
II.3.1.2 L'induction	25
II.3.1.3 Les Stations Better place	25
II.3.2 Structure du chargeur réseau (borne)	26
II.3.3 Les modes de charge.....	26
II.3.4 Temps de recharge du VE.....	27
II.4 Conclusion	29
Chapitre III : modélisation du système de traction véhicule électrique	
III.1 Introduction	30
III.2 Modélisation des convertisseurs électriques	30
III.2.1 Convertisseurs intégrant le système de charge	30
III.2.1.1 Redresseur	30
III.2.1.2 Hacheur	32
III.2.2 Convertisseurs du système de traction du véhicule	32
III.2.2.1 Dimensionnement du hacheur élévateur (Boost)	32
III.2.2.2 Onduleur.....	36
III.2.3 Convertisseurs du système de recharge de batterie par récupération.....	40
III.2.4 Convertisseur du système auxiliaire	40
III.3 Asservissement des convertisseurs.....	41
III.3.1 Boucles de contrôle de la tension et du courant (BCTC)	41
III.3.2 Contrôle linéaire des convertisseurs DC/DC.....	41
III.3.3 Les correcteurs (régulateurs) de base	42
III.3.3.1 Correcteur à action proportionnelle P	42
III.3.3.2 Correction à action Intégral.....	42
III.3.3.3 Correcteur à action proportionnelle et intégrale PI.....	43
III.3.4 Calcul du paramètre du régulateur PI	43
III.4 Présentation de la Machine synchrone à aimant permanent (MASP)	44
III.4.1 Principe de fonctionnement.....	44
III.4.2 Avantages de la MSAP	45

Table des matières

III.4.3 Inconvénients de la MSAP	45
III.5 Conclusion	46
Chapitre IV : simulation et interprétation des différents systèmes de véhicule électrique	
IV.1 Introduction	48
IV.2 Simulation du chargeur de batterie	48
IV.3 Simulation du système de traction du véhicule	51
IV.3.1 Simulation du moteur à vide	51
IV.3.2 Simulation du moteur avec charge	54
IV.4 Simulation du système de récupération d'énergie en mode freinage	56
IV.5 Simulation des systèmes auxiliares	58
IV.6 Simulation du profil du VE	59
IV.7 Conclusion	61
Conclusion générale	62

Table des figures

Figure I.1 Thomas Parker, 1884 dans une "carriole électrique"	4
Figure I.2 Jenatzy sur sa voiture électrique « La Jamais contente »	4
Figure I.3 Production des VE dans le monde d'après shaket (1979).....	5
Figure I.4 Composition de base d'un véhicule électrique	9
Figure I.5 Schéma synoptique d'une chaîne de traction.....	10
Figure I.6 Structure d'une machine à courant continu	11
Figure I.7 Structure d'une machine asynchrone.....	12
Figure II.1 Cellule électrochimique de base.....	18
Figure II.2 Batterie nickel cadmium industrielle.....	19
Figure II.3 Pack de batterie Nissan LEAF	22
Figure II.4 Borne de recharge	24
Figure II.5 Recharge de batterie par induction.....	25
Figure II.6 Schéma synoptique d'un chargeur réseau	26
Figure II.7 Estimation de kilométrages selon le type de la recharge.....	28
figure III.1 Les redresseurs	31
Figure III.2 Redresseuses mono alternances intégrant le chargeur de batterie	32
Figure III.3 Evolution du courant en fonction du cos phi à puissance active constante	33
Figure III.4 Correction du facteur de puissance	34
Figure III.5 Hacheur survolteur connecté à la batterie	35
Figure III.6 Onduleurs triphasés	37
Figure III.7 Comparaison de la porteuse à la modulente	38
Figure III.8 Allure de la tension de sortie du comparateur	38
Figure III.9 Redresseur triphasé non commandé pour la recharge de batterie	39
Figure III.10 Hacheurs dévolteur (Buck)	40
Figure III. 11 Boucle fermée de contrôle de tension et du courant	41
Figure III.12 Schéma du principe de régulation des convertisseurs	43
Figure III.13 Comparaison des structures des machines synchrones et à courant continue	45
Figure IV.1 Chargeur de batterie	48
Figure IV.2 Tension réseau	49
Figure IV.3 Tension redressée	49
Figure IV.4 Allure de la tension filtrée	50
Figure IV.5 Allure de tension de charge de la batterie	50
Figure IV.6 Allure du signal de commande	50
Figure IV.7 Schéma système de traction du véhicule	51
Figure IV.8 Tension du bus et celle de la batterie	52

Table des figures

Figure IV.9 Signaux de commande de l'onduleur	52
Figure IV.10 Courant consommé par le moteur	53
Figure IV.11 Tension de phase de l'onduleur	53
Figure IV.12 Vitesse du moteur	53
Figure IV.13 Courants de sortie de l'onduleur	54
Figure IV.14 Courant et tension de phase de l'onduleur	54
Figure IV.15 Courant fourni par la batterie et la vitesse en fonction de la charge (2 N.m)	54
Figure IV.16 Courants de sortie de l'onduleur	55
Figure IV.17 Courant et tension de phase de l'onduleur	55
Figure IV.18 Courant fourni par la batterie et la vitesse en fonction de la charge (6 N.m)	55
Figure IV.19 Montage génératrice pour la récupération d'énergie au freinage	56
Figure IV.20 Allure de courant récupéré au freinage	56
Figure IV.21 Courant définissant le couple de freinage	57
Figure IV.22 Allure de courant récupéré au freinage.....	57
Figure IV.23 Allure du Courant pour un faible couple	57
Figure IV.24 Profil du freinage	58
Figure IV.25 Circuit d'alimentation des auxiliaires	58
Figure IV.26 Profil de la vitesse, courant et couple	58
Figure IV.26 Allure tension de charge batterie (14V)	59
Figure IV.27 Simulation du comportement du véhicule	59
Figure IV.28 Profil de la vitesse, courant et couple	60
Figure IV.29 Vitesse et courant consommé par le moteur pour une référence de 250 rad/s .(AnnexeI)	

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Quelques VE sur le marché actuel7

Chapitre 2

Tableau II.I Temps moyen pour une batterie de 22 Kw/h28

Introduction générale

Le développement des projets en matière de véhicule électrique peut s'expliquer tout d'abord, par les objectifs environnementaux fixés mondialement pour lutter contre le changement climatique, et aux restrictions d'émissions polluantes (visant notamment à diminuer les émissions de CO₂). Afin de pallier ces problèmes, l'industrie automobile s'active à la conception de nouvelle voiture n'utilisant pas le pétrole comme source d'énergie, le véhicule électrique apparaît alors comme un levier de relance et de modernisation.

La maturité technologique de la batterie lithium-ion ouvre des perspectives pour le développement à grande échelle du véhicule électrique, cependant jusqu'à présent elle est le frein essentiel à son développement dont la capacité de stockage est insuffisante.

Par ailleurs la charge des batteries est un point important pour le développement du véhicule électrique. Actuellement, plusieurs systèmes sont mis en place (bornes de recharge, coupleurs inductifs) et permettent de répondre à l'attente des usagers. Des dispositifs de faible puissance (3kw) assurent une recharge dite lente complète des batteries durant les heures creuses (5 à 8 heures). Des systèmes plus puissants (supérieurs à 10KW) permettent une charge dite rapide (20 à 30 minute) et partielle (70 à 80 %), Les chargeurs lents imposent une masse supplémentaire et un surcout au véhicules quant aux dispositifs rapides sont complexe et très couteux [1].

L'idée de réutiliser les éléments de la chaîne de traction déjà existants dans le véhicule (convertisseur et moteur) pour concevoir une structure de charge, est alors apparue comme voie prometteuse pour rallonger l'autonomie des batteries, qu'on appelle le freinage par récupération d'énergie.

L'objectif du présent travail est de simuler le comportement de la chaîne de conversion d'énergie d'un VE basée sur l'utilisant d'une machine électrique fonctionnant dans les deux quadrants, en mode traction la batterie se décharge pour alimenter la machine électrique (fonctionnement moteur), en mode freinage la batterie se recharge par récupération de l'énergie dans les phases de décélérations (fonctionnement générateur).

La présente étude s'organise autour de quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente l'historique et généralités sur les véhicules à traction électrique.
- Le deuxième chapitre abordera le système de recharge de VE, qui dans un premier temps on traite la source de stockage de l'énergie qui est la batterie, dans un deuxième temps le chargeur de batterie.
- Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation des convertisseurs de la chaîne de traction du VE.
- Le quatrième pour la simulation et l'interprétation des résultats obtenus.

I.1 Introduction

Au début du 20ème siècle la voiture à essence connaît un succès important. Les voitures électriques de cette époque avaient une faible autonomie, et les batteries ne permettaient pas au moteur de délivrer autant de puissance qu'un moteur thermique. C'est pourquoi jusqu'à nos jours la voiture à essence s'est développée. La voiture électrique ne fait donc pas encore partie de notre entourage, mais ces dernières années les avancées technologiques en électronique de puissance et en électrotechnique ont rendu abordable l'électrification de certaines fonctions notamment dans le secteur du transport (automobile, aéronautique) et ont facilité leur mise en œuvre. En effet, l'arrivée de nombreux composants plus petits, plus performant et moins coûteux associé à l'expérience acquise dans le domaine de fortes puissances de la traction ferroviaire et le développement de nouvelle technique de commande permettent la réalisation d'une chaîne de traction plus performante en termes de rendement, couple et vitesse [1].

Ce chapitre a pour objectif de donner des généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant sur ce vaste domaine qui est la voiture électrique. Nous commençons par une description historique de véhicule à traction électrique, fonctionnement et description de la chaîne de traction, l'état actuelle, avantage et inconvénient et en fin une conclusion.

I.2 Historique de véhicule électrique

La toute première voiture électrique date de 1834. Le moteur à explosion, plus complexe, a vu son émergence plus tard, en 1861. La première commercialisation d'un véhicule électrique date de 1852. Mais ces premiers modèles n'utilisent pas de batterie électrique rechargeable. L'invention en 1859 de la batterie rechargeable au plomb acide par Gaston Planté puis les travaux de Camille Faure permettent à la voiture électrique d'avoir un succès encore jamais égalé à notre siècle.

Il a fallu un Thomas Parker pour combiner la batterie rechargeable et le moteur électrique afin de créer la première voiture électrique de série, construite à Londres en 1884 [2].



Figure I.1 Thomas Parker, 1884 dans une "carriole électrique" [2]

Le premier véhicule à franchir la barre des 100km/h est une électrique, la « Jamais contente » construite par le Belge Camille Jenatzy. Dans ses premières heures, la voiture électrique semble à même de concurrencer ses rivales, en particulier la voiture à combustion apparue quelques années après elle.



Figure I.2 Jenatzy sur sa voiture électrique « La Jamais contente » [3]

1900-1920 : A l'aube du XXème siècle, la voiture électrique accumule un retard technologique de plus en plus important face à ses concurrentes à essence. Déjà, la recharge des batteries, les

questions d'autonomie et de puissance posent problèmes. A l'inverse des voitures à essence qui s'industrialisent, les véhicules électriques semblent déjà atteindre leurs limites en ce qui concerne l'autonomie et la puissance [4].

1920-1960 : Entre cette période la voiture électrique tombe dans l'oubli. Seule une très courte parenthèse de deux ans entre 1940 et 1942 la remet sur le devant de la scène pour tenter de faire face à la pénurie d'essence provoquée par la guerre mondiale [4].

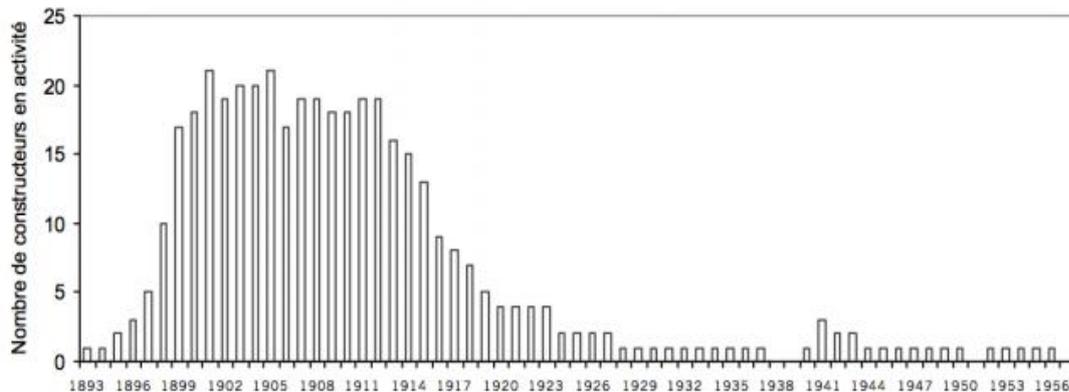


Figure I.3 Production des VE dans le monde d'après shaket (1979) [5]

1960-1990 : De nouvelles réalisations relancent la voiture électrique dans un contexte général qui évolue. En effet, les problématiques liées à l'environnement et aux économies d'énergie prennent de l'ampleur dans le débat politique. Toutefois, cet élan reste insuffisant pour imposer la voiture électrique sur le marché du véhicule individuel [4].

Après 1990, la voiture électrique devient le défi des constructeurs. Chaque année a lieu le salon de Los Angeles, qui présente des *concepts cars* dans une optique de perpétuelle évolution de la voiture propre. Sur le marché, c'est la (Toyota Prius) qui obtient la plus grande visibilité. Il s'agit de la première voiture hybride. Mais la voiture tout électrique ne parvient pas à offrir une utilisation réelle.

Aujourd'hui le véhicule électrique est devenu une réalité. Les principaux constructeurs automobiles, à l'image de Renault avec la ZOE en 2013 ont développé un modèle 100% électrique et les installations de bornes de recharge sont aujourd'hui de plus en plus nombreuses [2].

I.3 Définition du véhicule à traction électrique

Un véhicule électrique est défini comme étant une automobile entraînée par un ou plusieurs moteurs électriques fonctionnant exclusivement avec une source d'énergie électrique embarquée qui est généralement une batterie d'accumulateur [6].

I.4 Problématique du véhicule à traction électrique

Le véhicule électrique fait face au problème du stockage de l'énergie qui n'est pas encore totalement maîtrisée, ni totalement efficace.

Les batteries des dernières générations ne peuvent stocker qu'environ 150 Wh/Kg, soit près de 80 fois moins que les hydrocarbures. Au global, l'énergie électrique stockable dans 1000 Kg de batteries serait nécessaire pour parcourir la même distance qu'avec 50 Kg de gazole (60 litres), soit environ 1000 Km.

Un autre problème : le temps de recharge des batteries qui sont très long. Un plein pour 800 Km demande 3 minutes avec une voiture thermique alors qu'il faut plusieurs heures pour atteindre de quoi faire 200 Km en électrique [7]. Ce qui a fait de l'autonomie et le temps de charge les principaux freins de la voiture électrique.

I.5 Actualité sur le véhicule électrique

➤ Marché [8]

Quelques modèles actuels des VE avec leur prix, autonomie et batteries utilisées

Modèles	Autonomie	Vitesse max	Batterie	Prix avec batterie
 Tesla - Model X	413 km	250 km/h	Lithium-ion	81 000 €
 Volkswagen - e-Up 2017	160 km	135 km/h	Lithium-ion	21 600 €
 BMW - i3	285 km	150 km/h	Lithium-ion	33 950 €
 Tesla - Model S	455 à 557 km	225 à 250 Km/h	Lithium-ion	71 200 €

Tableau I.1 Quelques VE sur le marché actuel [8]

➤ Futur batterie

Bientôt la révolution de la batterie à électrolyte solide qui est sur le point d'émerger et pourrait rendre la voiture électrique plus compétitive que n'importe quelle autre motorisation. Certaines marques ont déjà programmé sa commercialisation.

Il s'agit de remplacer le solvant qui assurait l'électrolyte (substance conductrice de l'électricité) par une plaque de verre. En outre, cette batterie solide promet des performances hors du commun pour une technologie électrique. On parle d'une autonomie de plus de 600 km, soit autant qu'un plein de carburant.

Mieux encore, le temps de recharge pourrait être réduit à quelques minutes seulement. L'efficacité de ces batteries tient à la densité énergétique qui passerait de 150 Wh/kg (wattheure par kilogramme) pour une batterie lithium-ion classique, à près de 800 Wh/kg, voire même 1000 Wh/kg.

Il faut ajouter une durée de vie significativement rallongée et une plage de température nettement plus large avec lesquelles la batterie fonctionne de façon optimale passeraient d'une plage de 15 à 35 °C à une plage de -20 à 100 °C.

Selon le concepteur, Henrique Fisker, ancien designer en chef de la marque Aston Martin cette technologie verra le jour dans les trois prochaines années [9,10].

I.6 Présentation de véhicule électrique

Cette partie est consacrée pour l'étude du fonctionnement du véhicule électrique ainsi que les différents éléments constituant la chaîne de tractions du véhicule.

I.6.1 Fonctionnement

- ✓ Lors de la phase d'accélération, la machine électrique fonctionne en moteur.
- ✓ Lors de la phase de décélération ou freinage la machine fonctionne en génératrice l'énergie délivrée par ce générateur sera utilisée pour recharger la batterie [11].

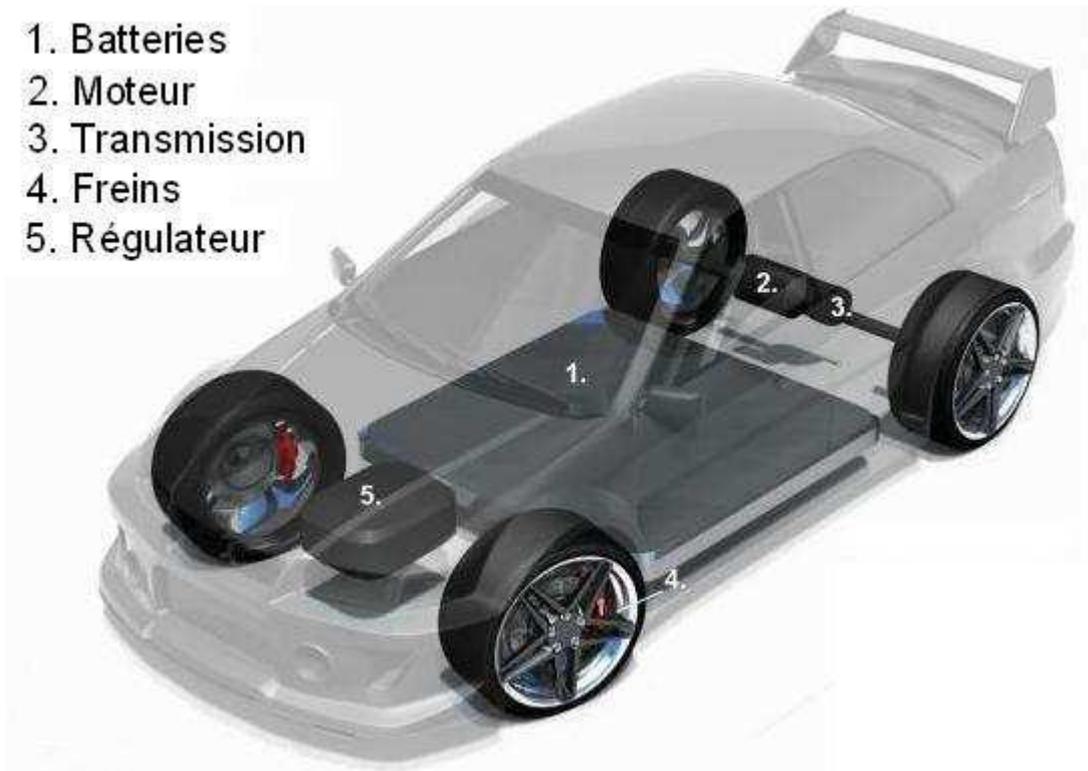


Figure I.4 Composition de base d'un véhicule électrique [12]

I.6.2 Description de la chaîne de traction électrique

La chaîne de traction est composée de différents éléments décrits dans la figure I.5 tels que : le réseau d'alimentation, le chargeur, la batterie d'accumulateur, l'ensemble des convertisseurs statiques, la machine électrique et en fin la transmission mécanique aux roues. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut prendre aussi le système auxiliaire en considération comme le chauffage, climatisation, radio, feux qui doivent être optimisés afin de maximiser l'autonomie de la batterie [1].

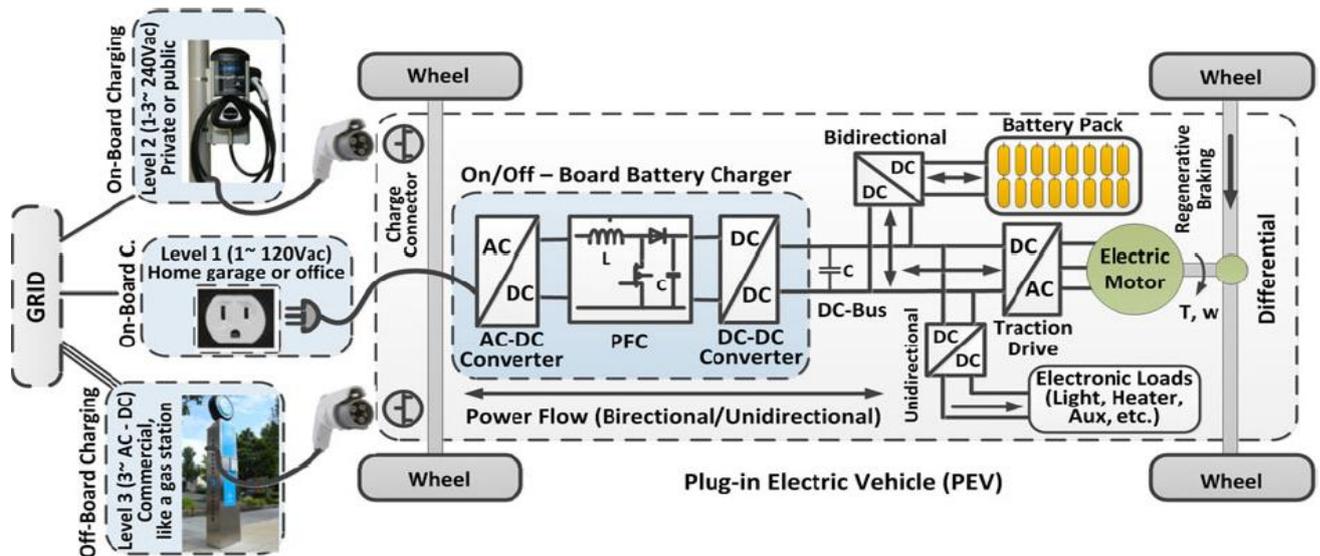


Figure I.5 Schéma synoptique d'une chaîne de traction [13]

I.6.2.1 Motorisation des voitures électriques

La machine électrique est l'élément essentiel de la voiture électrique, leur but est d'assurer la conversion électromécanique d'énergie.

- ✓ Mode moteur l'énergie électrique est convertie en une énergie mécanique.
- ✓ Mode générateur ou dynamo, l'énergie mécanique est convertie en une énergie électrique [14].

I.6.2.1.a Les machines à courant continu (MCC)

C'est une machine électrique constituée :

- D'un Stator (inducteur) : partie fixe d'une machine rotative qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents. Il est aussi appelé « inducteur » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine [15].
- D'un rotor (induit) : est formé d'un circuit magnétique feuilleté comportant des encoches dans les quelles sont placés des conducteurs associés pour former l'enroulement C'est un bobinage parcouru par un courant continu I (courant d'induit).
- Le collecteur et Balais : Les connexions avec la source qui alimente le moteur se font par l'intermédiaire de contacte mobile, les balais ou (charbons) frottent sur le collecteur

en rotation lié au rotor (induit). L'enroulement d'induit est relié au collecteur formé de lames conductrices isolées entre elles. Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.

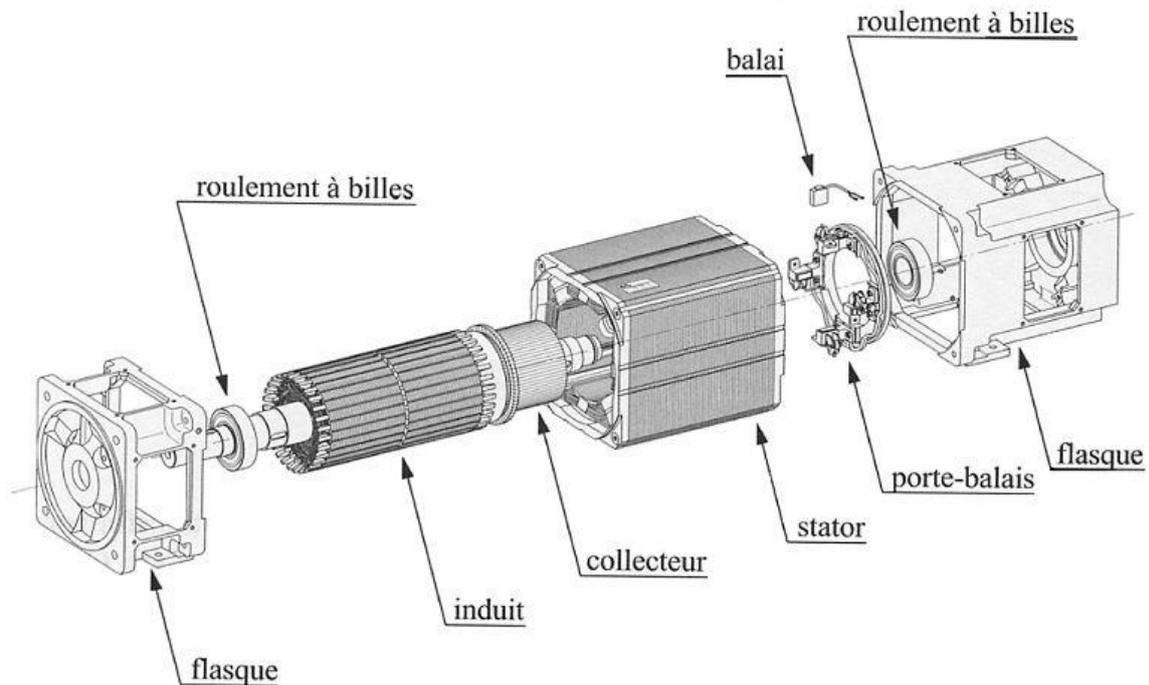


Figure I.6 Structure d'une machine à courant continu [15]

I.6.2.1.b Avantage et Inconvénients des machines à courant continu

- **Avantages**

- ✓ L'avantage principal des moteurs à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation.
- ✓ Possibilité d'entraîner de très fortes inerties.
- ✓ Forte constante de temps mécanique [16].

- **Inconvénients**

- ✓ La commutation du moteur à balais nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de pièces mécaniques pour faire la liaison par frottement entre les charbons et le collecteur, alors :
- ✓ Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important.
- ✓ Aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés régulièrement [16].

I.6.2.1.c Les machines asynchrones (MAS)

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor n'est pas exactement déterminée par la fréquence des courants qui traverse leur stator. Deux types de machine asynchrone peuvent être distingués : la machine asynchrone à bague et la machine asynchrone à cage d'écureuil. Son niveau de robustesse et de fiabilité allié à un faible coût en a fait une machine la plus utilisée dans l'industrie. Fonctionnant directement sur le secteur alternatif, c'est le moteur industriel par excellence qui ne possède pas d'organe délicat comme le collecteur de la machine à courant continu [14].

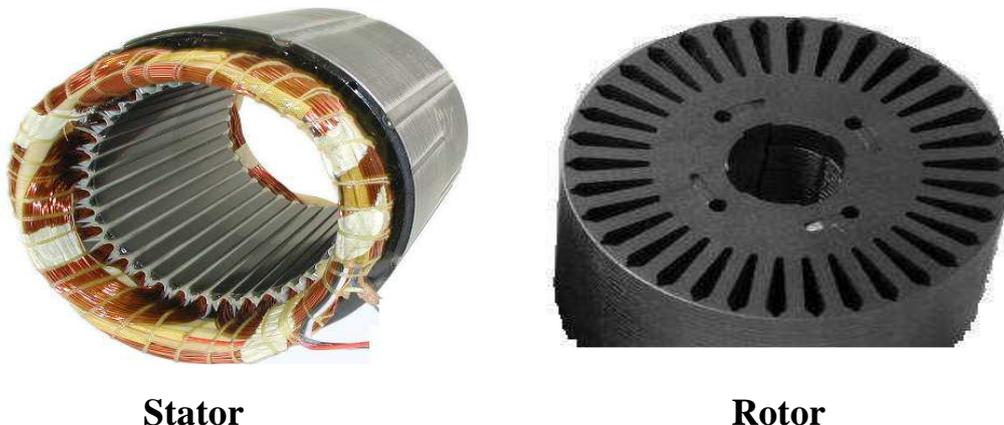


Figure I.7 Structure d'une machine asynchrone [14]

I.6.2.1.d Les machines synchrones

Bien que plus délicats à piloter, plus coûteux et potentiellement moins robuste, le choix du moteur synchrone s'est imposé dans les véhicules électriques, La machine synchrone offre le meilleur rendement en mode générateur et moteur, leur fréquence ne dépend que du réseau qui les alimente.

La véritable renaissance du moteur synchrone est assez récente : elle est due à l'association de ce moteur avec les onduleurs à thyristors que l'électronique de puissance a permis de mettre au point. Les onduleurs qui alimentent les moteurs synchrones fournissent à ces machines des courants triphasés de fréquence variable à partir d'une source de courant continu (elle-même obtenue par redressement à partir du réseau) [14]. On distingue trois types :

- ❖ **Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) :** utilisent des bobinages pour créer le champ rotorique [17].
- ❖ **Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) :** Aucune alimentation électrique n'est nécessaire pour le rotor. Ces moteurs utilisent en général des aimants terres rares, une matière première dont le prix ne cesse d'augmenter [17].
- ❖ **Machine synchrone à double excitation (MSDE) :** Tentent d'allier les avantages des MSAP (très bon rendement énergétique) à ceux des MSRB (facilité de fonctionnement à vitesse variable), le flux d'excitation dans ces machines est la somme d'un flux créé par des aimants permanents et d'un flux d'excitation créé par des bobines [17].

I.6.2.1.e La différence entre ces deux machines électriques (MS et MAS)

Les deux machines se composent d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile), la différence entre ces deux moteurs réside dans le rotor :

- le rotor des moteurs synchrones se compose d'un aimant ou électroaimant alors que celui des moteurs asynchrones est constitué d'anneaux (qui forment ce que l'on appelle la cage à écureuil).
- dans le cas de la machine synchrone, le rotor tourne à la même vitesse que le champ magnétique (vitesse de synchronisme). Dans le cas d'un moteur asynchrone, il y a un décalage entre la vitesse de rotation de l'arbre et le champ magnétique (le rotor tourne moins vite et n'atteint jamais la vitesse de synchronisme) [18].

I.6.2.2 Convertisseur statique

C'est l'ensemble des convertisseurs d'électronique de puissance (redresseur, hacheur et l'onduleur), utilisés dans la chaîne de traction du véhicule électrique.

I.6.2.3 Source d'énergie embarquée

Les batteries représentent la pièce maîtresse de la composition d'un véhicule électrique. Leurs performances peuvent varier de manière plus ou moins importante en fonction de la technologie qui leurs sont associées. Les recherches et études de ces deux dernières décennies ont finalement pu aboutir à une solution technologique intéressante et prometteuse, quant à l'amélioration des performances des véhicules électriques : les batteries au lithium.

Plus souvent dans le VE on parle de la batterie de puissance ou pack de batterie, composée de plusieurs accumulateurs montés en série, Toutefois, le mot « batterie » est souvent utilisé comme strict synonyme de « pack » [18].

I.7 Avantages et inconvénients du VE

I.7.1 Avantages

➤ Environnement

Le VE n'émet aucun gaz à effet de serre, ne rejette aucun hydrocarbure et aucune fumée [20].

➤ Silencieuse

C'est assez surprenant de n'entendre qu'un simple « souffle », la voiture est quasi silencieuse. Un véritable atout pour la quiétude des villes [21].

➤ Un entretien réduit

La voiture électrique demande peu d'entretien, aucune vidange ou changement de filtre à réaliser. Le système moteur est très simplifié par rapport à un véhicule thermique (essence, diesel ou gaz). Il y a cent fois moins de pièces en rotation [21].

➤ Economique

La VE est aussi économique, elle ne consomme pas d'énergie durant les phases de ralenti parce que les batteries ont la capacité de se recharger pendant ces phases (de ralenti). Et aussi en terme de cout l'électricité revient beaucoup moins cher que l'hydrocarbure [20].

➤ **Performances**

Le moteur électrique est beaucoup plus performant et offre un rendement nettement meilleur que le moteur thermique, environ 80% pour l'électrique contre 20 à 30% au moteur thermique. Cela veut dire que la voiture électrique met à profit 80% de l'énergie qu'elle utilise [22].

I.7.2 Inconvénients

Même si le véhicule électrique compte bon nombre d'avantages, certains inconvénients freinent aujourd'hui son développement.

➤ **Autonomie [23]**

Les batteries ont une autonomie limitée, une moyenne de 150Km, ce qui est peu si l'on compare à une voiture thermique qui peut aller jusqu'à 1200Km pour certain modèle.

➤ **Le temps de recharge et la disponibilité des bornes**

Le temps de recharge d'un VE est variable, il dépend de la puissance disponible au point de recharge. Aujourd'hui, il faut compter environ 8 heures pour faire une recharge sur une prise domestique. Quant aux bornes de recharge, elles ne sont pas toutes normalisées à l'échelle européenne [22,23].

➤ **Le coût d'achat**

Le VE reste plus cher à l'achat qu'un véhicule thermique à cause du coût élevé des packs de batteries [22].

➤ **Le silence**

C'est un avantage pour l'utilisateur mais pas forcément pour certains usagers de la route, comme les malvoyants, malentendants, qui ne pourront plus entendre l'arrivée du véhicule, ce qui a déjà provoqué des accidents [22].

I-8 conclusion

Ce premier chapitre est consacré pour l'historique et généralités sur le VE. Après avoir exposé la problématique, l'actualité dans le marché et la description des différents éléments constituant le véhicule. Nous avons conclu que le VE présente de nombreux avantages, en terme de performance moteur, cependant il est confronté aux problèmes qui freine son développement tel que le stockage d'énergie et son cout d'achat très élevé d'ailleurs c'est pour cela qu'il ne se rivalise pas avec son concurrent thermique.

II.1 Introduction

Dans les véhicules électriques, le choix de système de stockage, son dimensionnement et son intégration au sein de l'architecture électrique du véhicule doivent être étudiés en détails pour que la source puisse répondre aux besoins en énergie et en puissance imposés par le profil de mission [19]. Cependant, la problématique du stockage d'énergie reste des aspects à optimiser pour profiter d'une meilleure autonomie du VE. D'ailleurs, de nombreuses études se focalisent sur l'amélioration des matériaux de stockage (batteries), mais aussi sur les moyens de recharge (chargeur).

Dans ce chapitre nous commençons par une description des différents types d'accumulateurs, les avantages et inconvénients de chaque type ainsi que leurs caractéristiques. En deuxième lieu, on va présenter les différents moyens de charge, la structure et le principe du chargeur réseau. Par la suite les différents modes de charge et en fin le temps de charge des batteries qui est en fonction de la puissance délivré par la source et la nature du chargeur.

II.2 Les batteries des véhicules électriques

II.2.1 Fonctionnement

La batterie appelé aussi accumulateur électrochimique du véhicule électrique est un générateur réversible c'est-à-dire transforme une énergie chimique en une énergie électrique lors de l'alimentation électrique du véhicule et inverse le processus pour sa recharge [24].

De point de vue physique ça marche ainsi :

- Dans chaque élément, deux électrodes (anode et cathode) de matériaux différents sont séparées par un électrolyte, une substance solide ou liquide qui permet le passage du courant électrique.
- Des électrons, porteurs de charges électriques (ions) issus des électrodes migrent de l'une vers l'autre, créant un courant électrique [25].

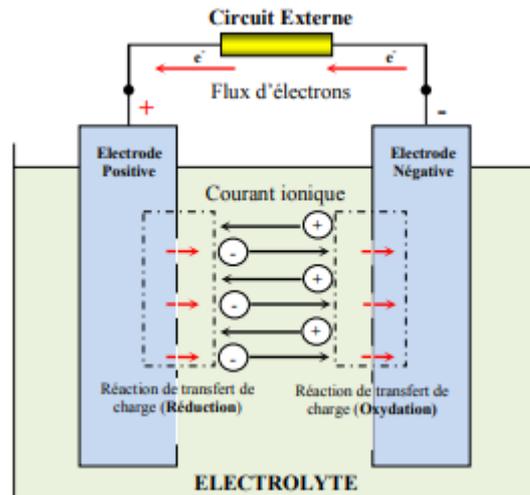


Figure II.1 Cellule électrochimique de base [26]

II.2.2 Caractéristiques des batteries [24]

Un accumulateur, quelle que soit la technologie utilisée, est pour l'essentiel défini par les paramètres suivants :

- La densité d'énergie massique (ou énergie spécifique), en Wh/kg correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse d'accumulateur.
- La densité d'énergie volumique, en Wh/l correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de volume d'accumulateur.
- La densité de puissance massique, en W/kg, représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur ;
- Le nombre de cycles (un cycle correspond à une charge et une décharge), caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge.
- La tension nominale dépend du nombre d'éléments.
- La capacité de stockage, notée Q, représente la quantité d'énergie disponible (à ne pas confondre avec la capacité électrique), elle s'exprime en Ah.
- Le courant maximal qu'elle peut fournir pendant quelques instants, ou courant de crête.

II.2.3 Principaux types de batteries

➤ Les accumulateurs au plomb [27]

Une batterie dite au plomb est une batterie qui utilise une anode et une cathode en plomb. Elle présente l'avantage de délivrer un courant de forte puissance permettant d'alimenter des moteurs eux aussi puissants. En revanche, elles ont une densité énergétique faible et offrent donc une faible autonomie à un véhicule. de plus leurs durée de vie est plutôt limité.

Leur principal avantage, elles sont simples à produire et le plomb est un métal commun leur cout et donc faible. Cependant, le plomb est toxique est polluant même si 'il se recycle plutôt facilement.

➤ Les accumulateurs nickel-cadmium

L'accumulateur NI-CD est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'hydroxyde de nickel et du cadmium comme électrodes [24].

Ces accumulateurs sont très courants dans l'industrie en général et ont équipée un certain nombre d'anciens projets de véhicule électrique. Elles sont légèrement plus performantes que les batteries au plomb (jusqu'à 80 Wh/kg) et relativement bon marché. Cependant, elles possèdent un effet mémoire important ce qui rend leur utilisation contraignante. De plus, le cadmium est très polluant et difficile à recycler [27].



Figure II.2 Batterie nickel cadmium industrielle [24]

Points forts

- ✓ Charge simple et rapide, même après une longue période de stockage, et notamment à froid.
- ✓ Grande durée de vie en nombre de cycles de charge et de décharge.
- ✓ Conserve ses performances à basse température et ne vieillit pas prématurément à haute température.
- ✓ Résistance interne très faible.
- ✓ Stockage aisé, quel que soit son niveau de charge [28].

Points faibles

- ✓ Faible densité énergétique.
- ✓ S'auto-décharge assez rapidement (20 % / mois).
- ✓ Sensibilité à l'effet mémoire.
- ✓ Contient des substances dangereuses (6 % de Cd) ce qui implique qu'il doit être collecté en fin de vie pour recyclage.
- ✓ Coût d'achat plus élevé que la technologie standard [28].

➤ **Accumulateur nickel hydrure métallique** [28]

Un accumulateur nickel-hydrure métallique ou NiMH (de l'anglais nickel-metal hydride) est un accumulateur électrique rechargeable utilisant de l'hydrure métallique (composé permettant de stocker de l'hydrogène) et de l'oxyhydroxyde de nickel comme électrode.

Les accumulateurs Ni-MH ont été commercialisés vers 1990 et présentent une énergie volumique supérieure d'au moins 30 % par rapport aux accumulateurs Ni-Cd (Nickel-Cadmium). Ils sont aujourd'hui eux-mêmes dépassés en termes d'énergie massique par les accumulateurs Li-ion (Lithium-ion) et Lithium-Polymère.

L'avantage, en matière d'environnement, des batteries Ni-MH est l'absence de cadmium et de plomb, deux matériaux très polluants. En outre, elles possèdent de meilleures performances et une plus faible sensibilité à l'effet mémoire.

Leurs fabrications et leurs recyclages doivent néanmoins se faire très soigneusement, car l'hydroxyde de potassium est irritant et corrosif pour la peau, les yeux et les voies respiratoires et digestives.

Points forts du Ni-MH

- Contient beaucoup plus d'énergie que le nickel-cadmium
- Peu sensible à l'effet mémoire
- Simple à stocker et à transporter
- Ne contient pas de cadmium

Points faibles du Ni-MH

- Ne supporte pas le dépassement de charge
- Détection de fin de charge difficile (Δv très faible)
- Durée de vie plus faible que le nickel-cadmium en nombre de cycles

➤ Accumulateur au lithium

Un accumulateur lithium est un accumulateur électrochimique dont la réaction est fondée sur l'élément lithium.

Au début du XXI^e siècle, c'est l'accumulateur qui offre la plus forte énergie spécifique (énergie/masse) et la plus grande densité d'énergie (énergie/volume). Il existe plusieurs sortes d'accumulateurs au lithium :

- L'accumulateur lithium-métal, où l'électrode négative est composée de lithium métallique (matériau qui pose des problèmes de sécurité).
- Les accumulateurs lithium-polymère sont une alternative aux accumulateurs lithium-ion, ils délivrent un peu moins d'énergie, mais sont beaucoup plus sûrs.
- Les accumulateurs lithium-ion, où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer) [24].

Les accumulateurs au lithium-ion sont largement utilisés dans l'industrie des ordinateurs portables, les téléphones, et les systèmes embarqués à cause de leur haute densité d'énergie. D'ailleurs, ils ont une bonne performance à température élevée et une faible auto décharge d'autant plus qu'ils ne présentent aucun effet mémoire [29]. Par exemple L'astromobile Opportunité possède une batterie au lithium-ion rechargeable avec ses panneaux solaires. Il a fonctionné pendant de nombreuses années malgré un froid intense à -100 °C sur la planète Mars [24].

II.2.4 Pack de batterie de VE

Dans les véhicules électriques, le système de stockage d'énergie (SSE) est constitué d'un pack de batterie généralement haute tension (quelques centaines de Volts). Le pack batterie est formée de plusieurs modules à leur tour formés de plusieurs cellules unitaires connectées en série ou en parallèle selon que l'on veut avoir, respectivement, plus de puissance ou plus d'énergie. La cellule ou élément constitue donc la base d'un SSE et est le plus petit format qu'une batterie peut prendre.



Figure II.3 Pack de batterie Nissan LEAF [30]

Il est à noter que le véhicule électrique, tout comme le véhicule conventionnel, est également équipé d'une batterie plomb-acide de 14 V. Cette batterie ne sert pas à la propulsion du véhicule mais bien à l'alimentation électrique de certaines fonctions secondaires (p.ex. éclairage, système de son, etc..).

II.2.5 l'hybridation dans les stockeurs

Un système de stockage hybride associe plusieurs technologies de stockage dans le but d'exploiter au mieux les avantages de chacune. Pour réaliser cette hybridation il est nécessaire de combiner un stockage haute puissance noté HP capable d'émettre et de recevoir de fortes puissances à un stockage haute énergie noté HE dont la capacité énergétique est importante.

L'association batterie batterie/supercondensateur est relativement courante dans les systèmes de stockage hybride, elle associe donc l'énergie spécifique des batteries à la forte puissance des supercondensateurs [31].

L'utilisation des supercondensateurs dans les VE n'est pas destinée au stockage d'énergie mais plutôt à la fourniture et la récupération de fortes puissances sur de courtes durées.

En automobile, les stockeurs de puissance à base de supercondensateurs sont dimensionnés pour fournir une forte puissance sur une constante de temps propre aux phases d'accélération et qui est de l'ordre de la dizaine de seconde [32].

II.2.6 Détermination de l'état de charge de la batterie (SOC)

L'état de charge est la quantité de charge disponible dans la batterie à un instant donné en fonction de sa capacité maximale. Dans la majorité des applications faisant intervenir un système de stockage d'énergie, la connaissance de l'état de charge de la batterie est primordiale. C'est l'équivalent d'une jauge d'essence pour une voiture ordinaire. Dans le cas d'un véhicule électrique, cette information va aider le conducteur à savoir la distance restante à parcourir avant que sa batterie ne se vide. D'ailleurs, cette indication va nous aider à éviter une décharge profonde ou une charge excessive de la batterie. Ainsi, la durée de vie de la batterie sera plus grande [33].

L'unité de SOC est 100% ou 1 pour une batterie pleinement chargée et 0% ou 0 pour une batterie dite vide.

$$SOC_{\%} = SOC \times 100 = \left(\frac{\text{la capacité actuelle (Ah)}}{C_X \text{ (Ah)}} \right) \times 100 \quad (\text{II.1}) \quad [33]$$

II.2.7 Mécanisme de dégradation des batteries lithium-ion

Le vieillissement des batteries lithium-ion se manifeste par une dégradation des performances traduite par une perte de capacité en fonction des cycles ainsi qu'une augmentation de l'impédance. Cette évolution de l'impédance est fortement liée à l'augmentation de la résistance de surface de l'anode et de la cathode. Cette surface affect directement le fonctionnement puisque les réactions électrochimique se déroule à ce niveau [34].

II-3 Le Chargeur de batterie

Le chargeur est un élément essentiel dans le VE, il permet de recharger la batterie à sa décharge, plusieurs types (modes) de recharge ont été développés à ce jour, cependant c'est les caractéristiques et les performances du chargeur qui déterminent la nature de celui-ci.

II.3.1 Les moyens de recharge [6]

II.3.1.1 La borne

Comme son nom l'indique, il s'agit d'un mode de recharge avec fil. Il consiste à brancher sa voiture sur une borne à l'aide d'un fil de connexion. C'est le moyen le plus connu et le plus répandu. Ces bornes sont disponibles dans des lieux publics (stations de recharge), ou chez un particulier, la différence entre ces deux lieux est le temps de recharge. Par conséquent, la puissance délivrée dans les lieux publics est plus importante que chez un particulier. Environ 6 heures de recharges chez le particulier (230V/8A) alors qu'il faut compter environ 20 minutes sur les stations publiques (400-500V/63A).



Figure II.4 Borne de recharge [6]

II.3.1.2 L'induction

Il s'agit d'une méthode de recharge sans fils. Le transfert de l'énergie se fait par l'induction magnétique (similaire à celle d'un transformateur), sans contact électrique. Le chargeur est constitué de deux parties essentielles, la première étant externe au véhicule, située au sol, elle permet d'alimenter le primaire qui joue le rôle d'un émetteur. La seconde partie est embarquée

au sein du VE, elle correspond au circuit récepteur qui commence à partir du secondaire du transformateur.

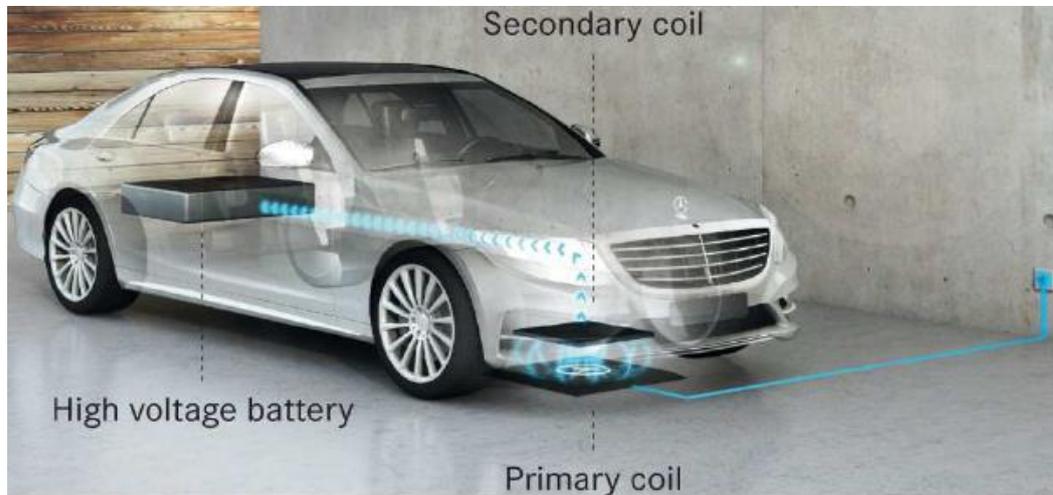


Figure II.5 Recharge de batterie par induction [35]

La recharge par induction n'a pas pour but premier une recharge complète, elle assure simplement une recharge moyenne. Ce moyen de recharge se trouve généralement sur les places de stationnement.

II.3.1.3 Les Stations better place

Better place est le nom d'une société israélienne créée par Shai Agassi qui projette de remplacer les batteries déchargées par de nouvelles, dans ces stations de recharge.

Il consiste, à l'aide de robot à enlever la batterie présente à l'arrière de la voiture au niveau du coffre. Celle-ci va être récupérée par un robot et conduite vers ces bornes de recharge. De même serait acheminée une nouvelle batterie et ainsi remise en place. C'est un dispositif qui ne durerait pas plus de 5 minutes (le temps d'un plein de carburant).

On s'intéressera à la recharge de type borne ou la charge à partir du réseau car c'est la plus répandue actuellement par rapport à l'induction et la station qui ne sont pas encore développés.

II.3.2 Structure du chargeur réseau (borne)

Principes

La charge à partir du réseau alternatif se fait en deux étapes

- Conversion AC/DC : transformation du courant alternatif délivré par le réseau en courant continu.
- Conversion DC/DC : le courant issue de la première conversion est modifié pour correspondre au profil de charge de la batterie. [29]

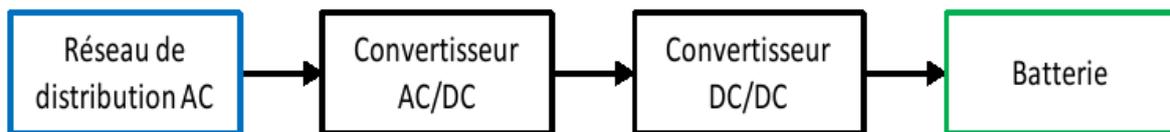


Figure II.6 Schéma synoptique d'un chargeur réseau

Deux grandes familles de chargeurs partagent le marché du véhicule électrique :

- ✓ chargeur externe: installé à l'extérieur du véhicule, il adapte l'énergie de la source à la batterie, ainsi le chargeur externe assure la conversion AC/DC afin de permettre la recharge en énergie continue.
- ✓ chargeur embarqué : intégré au sein du véhicule, l'énergie électrique délivrée par le réseau est transmise au véhicule, la conversion se fait à l'intérieur cette configuration ne nécessite pas de configuration supplémentaire au sol [29,35].

II.3.3 Les modes de charge [36]**➤ Mode 1**

Correspond à une prise de courant traditionnelle avec mise à la terre. Toutes les voitures électriques permettent de se brancher à une prise domestique, mais l'absence de circuit dédié limite la puissance délivrée. La recharge est donc très lente.

➤ Mode 2

Pour augmenter l'intensité du courant (et donc la puissance délivrée), il faut un boîtier électronique chargé de réguler la charge. Il en surveille les paramètres et interrompt le transfert dès qu'un phénomène anormal est détecté.

On parle de « mode 2 » quand ce dispositif de contrôle est intégré au câble de recharge.

➤ Mode 3

Correspond à un dispositif de contrôle intégré directement à la borne électrique. Conseillé pour la recharge à domicile ou dans les espaces privés, elle passe par l'installation d'une wallbox, un boîtier électronique qui pilote finement tous les aspects de la recharge. Souvent doté de fonctions de programmation, il est alimenté par un circuit électrique dédié, capable de délivrer une puissance plus de deux fois supérieure à celle d'une prise domestique standard, ce qui explique que le prix d'une borne de recharge intègre des frais liés à l'installation.

➤ Mode 4

Englobe quant à lui les infrastructures de recharge rapide que l'on rencontre dans certains lieux publics, parkings ou aires d'autoroute. Elles délivrent généralement un courant continu de très haute intensité.

II.3.4 Temps de recharge du VE

La durée nécessaire au rechargement maximum des batteries est directement liée à la puissance électrique injectée. Le temps de charge normal ou bien accélérée défères pour l'autonomie des batteries des VE (figure II.7)

Durée de charge	Alimentation	Puissance	Tension	Intensité maxi
12-14 heures	Monophasé	2KW	230 VAC	8 A
6-8 heures	Monophasé	3.7 KW	230 VAC	16 A
2-3 heures	Triphasé	11 KW	400 VAC	16 A
3-4 heures	Monophasé	7 KW	230 VAC	32 A
1-2 heures	Triphasé	22 KW	400 VAC	32 A
20-30 minutes	Triphasé	43 KW	400 VAC	63 A
20-30 minutes	Continu	50 KW	400-500 VDC	100-125 A

Tableau II.1 Temps moyen pour une batterie de 22 Kw/h [37].

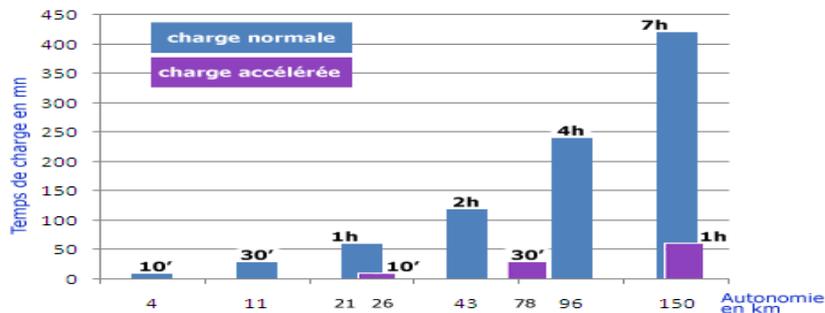


Figure II.7 Estimation de kilométrages selon le type de la recharge [37].

II.4 Conclusion

Il existe plusieurs types d'accumulateurs en tant que source d'énergie embarquée pour les véhicules électriques, leurs caractéristiques diffèrent d'un accumulateur à un autre, les batteries au lithium sont celles que l'on retrouve dans les véhicules électriques actuellement sur le marché, donc c'est la solution la plus adaptée en terme de temps de charge, durée de vie et fiabilité.

Quant au chargeur de VE, Les caractéristiques des chargeurs de type "rapide" permettent de jouer le rôle de "station-service" et donc en l'occurrence de parfaitement compléter la fonction du chargeur de type "lent" qui reste indispensable pour assurer une plus grande longévité aux batteries.

III.1 Introduction

Avec l'apparition des semi-conducteurs, les convertisseurs statiques sont devenus des éléments indispensables dans le domaine de l'électronique de conversion d'énergie.

Aujourd'hui leur champ d'application est très large, notamment dans les véhicules électriques actuels. Leurs contributions apparaissent dans le fait qu'ils sont utilisés dans le système de charge des batteries, la traction du VE.

Les premières machines électriques à être utilisées dans les VE furent celles à courant continu MCC. Ce choix était logique il y a 30 ans car c'était le plus facile à commander en vitesse. Avec l'apparition de l'onduleur les machines synchrones et asynchrones ont vu le jour. Les plus performantes actuellement sont les machines synchrones (à aimants permanents et rotor bobiné). Grâce aux aimants permanents qui produisent une densité magnétique élevée, on peut construire des moteurs synchrones plus compacts et plus légers que les moteurs asynchrones de même puissance, présentant des couples et des puissances massiques avec des rendements élevés [39].

En premier lieu nous allons commencer par la modélisation des différents convertisseurs intégrant le système du VE qu'on expliquera juste après l'introduction. Par la suite une description de la machine synchrone à aimants permanents. Et enfin nous évoquons la régulation qui est une étape importante dans notre travail de simulation.

III.2 Modélisation des convertisseurs électriques

III.2.1 Convertisseurs intégrant le système de charge

Dans cette partie on présentera les types de convertisseurs utilisés pour la charge de la batterie à partir du réseau.

III.2.1.1 Redresseur

Appelés convertisseur alternatif/continu, ils permettent d'alimenter une charge qui nécessite de l'être par un courant ou une tension continue à partir d'une source alternative.

Selon le choix de l'interrupteur, on distingue deux types de redresseur :

- ✓ Non commandés, réalisés à partir de diodes, ils sont utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.

Chapitre III Modélisations des convertisseurs de la chaîne de traction du véhicule électrique

- ✓ Commandés, dont les grandeurs électriques de sorties peuvent être variables, réalisés par des thyristors ou ensembles de diodes et thyristors.

Selon le type de l'alimentation monophasé ou triphasé, on distingue des redresseurs :

- ✓ Mono alternance, ce type de redressement permet de supprimer l'alternance négative d'un signal en conservant l'alternance positive.
Double alternance, les interrupteurs commutent de manière à transformer les tensions négatives en positives tout en gardant les alternances positives.

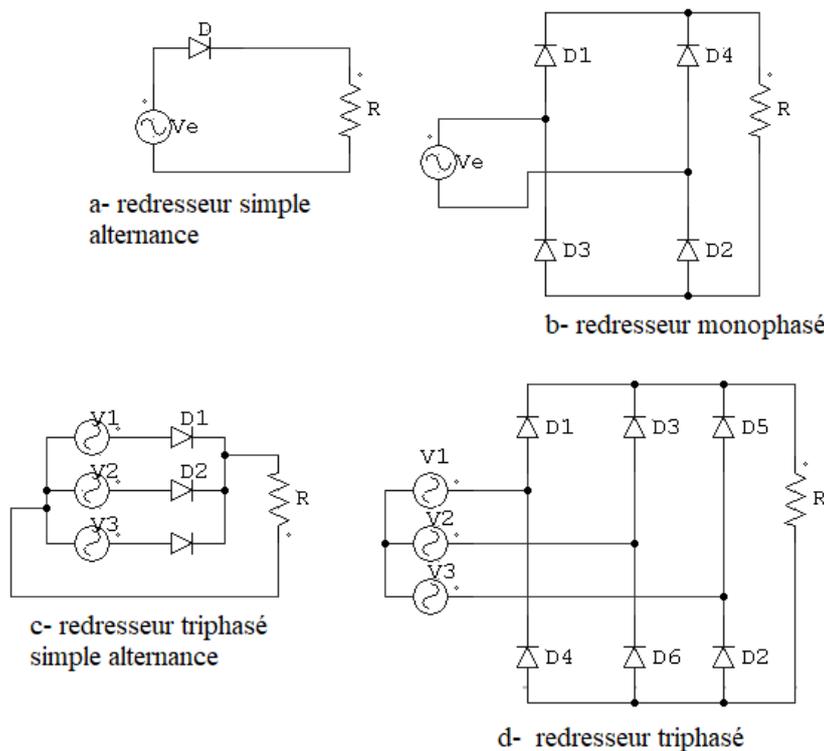


Figure III.1 Les Redresseurs

Pour avoir un redresseur commandé, il suffit de remplacer les diodes par les thyristors.

Dans notre cas on utilisera un redresseur non commandé monophasé double alternance (PD2), car la recharge de la batterie du véhicule se fait à partir d'un réseau monophasé.

La tension du réseau sera redressée, filtrée par la suite pour avoir une tension continue en sortie.

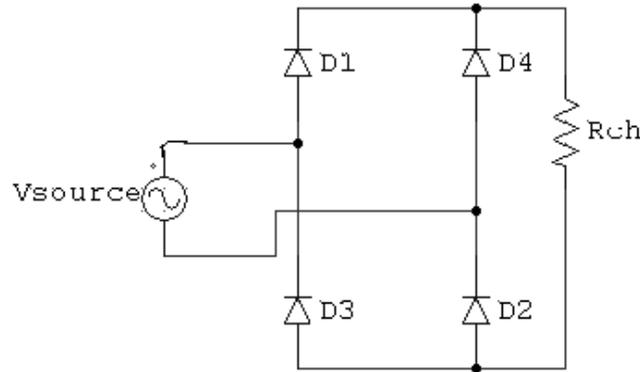


Figure III.2 Redresseuses mono alternances intégrant le chargeur de batterie

Pendant l’alternance positive c’est les diodes D1 et D2 qui vont conduire et pendant l’alternance négative c’est les diodes D3 et D4 qui vont conduire.

En utilisant un réseau monophasé de valeur efficace 220 V. la valeur moyenne de la tension de sortie est :

$$V_{chmoy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{ch}(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_M \sin(\omega t) dt \quad (\text{III.1})$$

Finalement,

$$V_{chmoy} = \frac{2 V_M}{\pi} \quad \text{Avec : } V_M = V_{eff} \sqrt{2} \quad (\text{III.2})$$

III.2.1.2 Hacheur

Le convertisseur DC/DC ou hacheur, permet de fournir à partir d'une source de tension fixe une source de tension de valeur moyenne réglable. Il est essentiellement constitué d’interrupteurs de puissance (transistors, thyristor diodes...) et de composants passifs (inductances, condensateurs, résistances).

Dans cette partie l’utilisation d’un hacheur va permettre de jouer le double rôle entre élever la tension redressée provenant du secteur et à la fois comme étant un circuit de correction du facteur de puissance.

Qu'est-ce qu'un PFC ?

On désigne l'angle entre la puissance active et apparente par la lettre phi (φ). Le $\cos \varphi$ est donc le rapport entre la puissance active et la puissance apparente, appelé aussi le facteur de puissance.

Plus l'installation consomme de l'énergie réactive, plus le $\cos \varphi$ est faible, autrement dit plus il est mauvais. Pour une même puissance consommée, plus le $\cos \varphi$ sera faible, plus la puissance apparente sera élevée, donc plus le courant absorbé sera grand. Cela entraîne une surcharge des câbles, des générateurs, des appareillages de commutation et des transformateurs de distribution ainsi qu'une augmentation des pertes (fonction du carré du courant) [40].

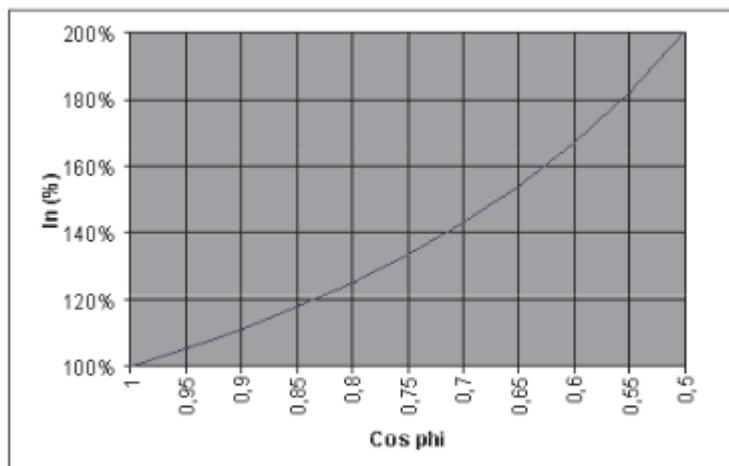


Figure III.3 Evolution du courant en fonction du $\cos \varphi$ à puissance active constante [40]

La correction du facteur de puissance (PFC) se fait par un circuit électrique de puissance composé de un hacheur élévateur. Il est utilisé pour la protection du réseau, puisque le redresseur représente une source de pollution pour le réseau, améliorent ainsi l'efficacité du courant en réduisant la charge sur l'alimentation.

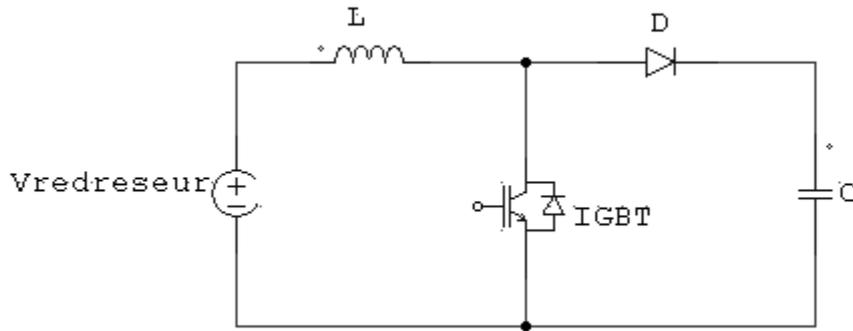


Figure III.4 Correction du facteur de puissance

Dans cette configuration du hacheur montré dans la figure, la bobine emmagasine de l'énergie provenant de la source électrique sous forme magnétique quand IGBT est passant tandis que le condensateur alimente la charge. Quand l'IGBT est bloqué et D est passante, l'énergie emmagasinée dans L est transférée vers la charge [41].

Etude réalisée avec les hypothèses suivantes :

- Le condensateur de sortie a une capacité suffisante pour fournir une tension constante à la charge, de même pour la bobine elle doit assurer une ondulation en courant tolérée
- La chute de tension aux bornes de la diode est nulle.
- Pas de perte dans les composants de manière générale.

III.2.2 Convertisseurs du système de traction du véhicule

Le système de traction est l'ensemble de batterie, la machine électrique et le convertisseur permettant le pilotage du moteur.

La batterie haute tension alimente le hacheur élévateur, la tension issue du hacheur sera utilisée pour alimenter l'onduleur qui alimentera à son tour le moteur.

III.2.2.1 Dimensionnement du hacheur élévateur (Boost)

On prend comme point de départ le fait que la distribution de l'énergie électrique dans le véhicule est réalisée par un bus continu de tension 500 V.

Le hacheur permet d'élever la tension provenant d'une batterie de 400V et la fixer à une tension de 500V qui est la tension du bus qui alimentera l'onduleur.

Chapitre III Modélisations des convertisseurs de la chaîne de traction du véhicule électrique

Il a le même fonctionnement que celui de la correction du facteur de puissance, son schéma est donné dans la figure III.5.

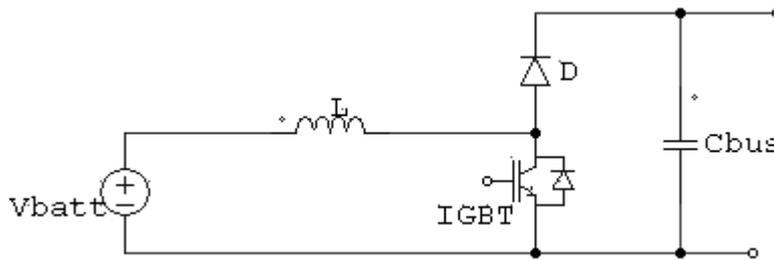


Figure III.5 Hacheur survolteur connecté à la batterie

Le condensateur doit être dimensionné de manière à avoir une tension stabilisée au bus continu avec des tensions admises. De même pour la bobine, elle doit assurer une ondulation encourant tolérée.

Quand IGBT est fermé, l'expression du courant de la batterie et de la tension du bus sont définies par :

$$\frac{dI_{\text{batt}}}{dt} = \frac{1}{L} V_{\text{batt}} \quad (\text{III. 3})$$

Et la tension du bus continu est exprimée par la relation suivante :

$$\frac{dV_{\text{bus}}}{dt} = -\frac{1}{C_{\text{bus}}} I_{\text{bus}} \quad (\text{III. 4})$$

Quand IGBT est ouvert, l'expression de la tension et du courant dans le bus sont définies par

$$\frac{dI_{\text{batt}}}{dt} = \frac{1}{L} (V_{\text{batt}} - V_{\text{bus}}) \quad (\text{III. 5})$$

$$\frac{dV_{\text{bus}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{bus}}} (I_{\text{batt}} - I_{\text{bus}}) \quad (\text{III. 6})$$

Chapitre III Modélisations des convertisseurs de la chaîne de traction du véhicule électrique

A savoir la chute de tension au niveau de la diode est négligée. On admet que le hacheur fonctionne en mode conduction continu. La tension moyenne du bus continue est :

$$V_{busmoy} = \frac{1}{1-\alpha} E \quad (III.6)$$

Grâce à cette expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique α variant entre 0 et 1), c'est pour cela qu'on l'appelle survolteur.

- ❖ Dans le cas des fortes accélérations, on aura besoin d'un super condensateur de plus à la batterie, qui permet de fournir des tensions instantanées. Donc la tension du bus sera alimentée par deux sources d'énergies comme le montre la figure 1 en annexe [41].

III.2.2.2 Onduleur

C'est un convertisseur permettant de transformer une tension continue en une tension alternative (sinusoïdale) réglable à une amplitude et à la fréquence permettant le fonctionnement désiré.

Dans notre cas on utilisera un onduleur de tension, permettant d'alimenter le moteur électrique en tensions triphasées, à partir de la tension continue de la batterie.

Le schéma est représenté en figure ci-dessous :

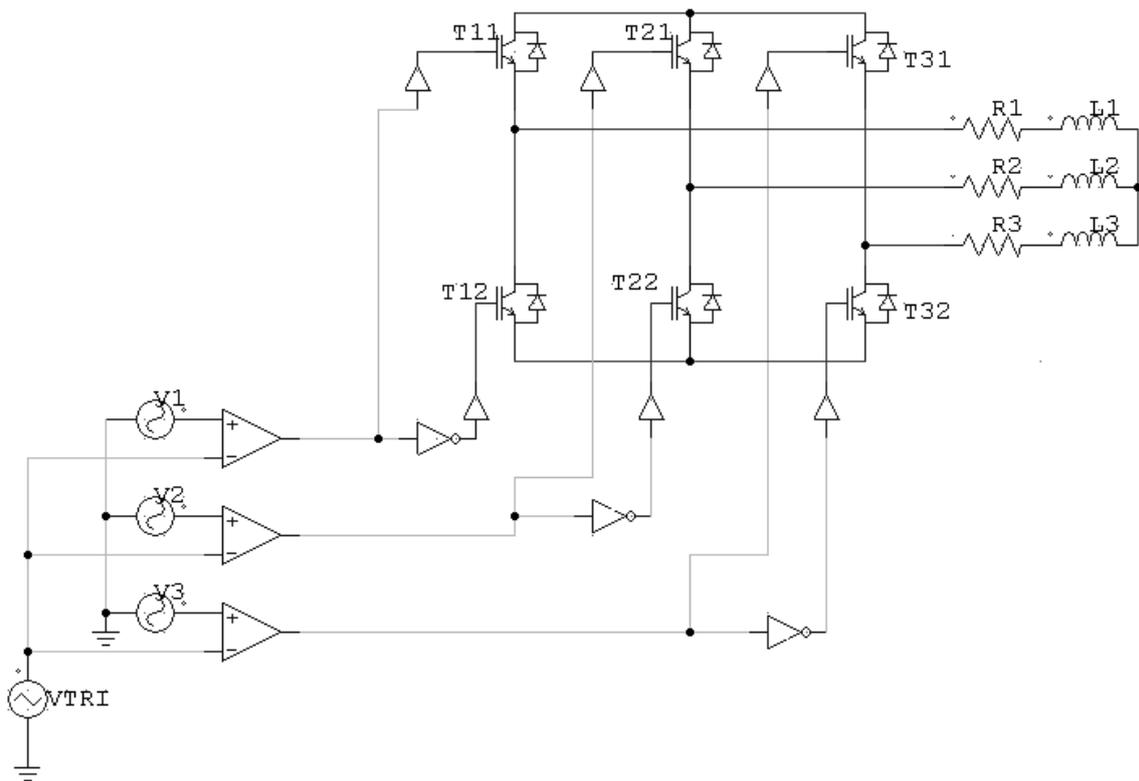


Figure III.6 Onduleurs triphasés

Principe de commande

Le principe de commande est basé sur la modulation de largeur d'impulsion (MLI), l'idée est de découper la tension continue à haute fréquence dont la fréquence de découpage est choisie de façon à supprimer le maximum d'harmonique de rangs faible difficile à filtrer afin de reconstituer par morceaux une sinusoïde à la fréquence et amplitude voulue.

On l'utilise sur tout quand le moteur nécessite une alimentation par des tensions quasi sinusoïdale pour que les harmoniques du couple soient très réduites. La technique la plus répandue est la MLI intersective, qui consiste à comparer un signal triangulaire onde porteuse, avec un signal sinusoïdal onde modulatrice (figure III.7).

Le signal issu du comparateur (figure III.8) détermine la fréquence de commutation des transistors [42].

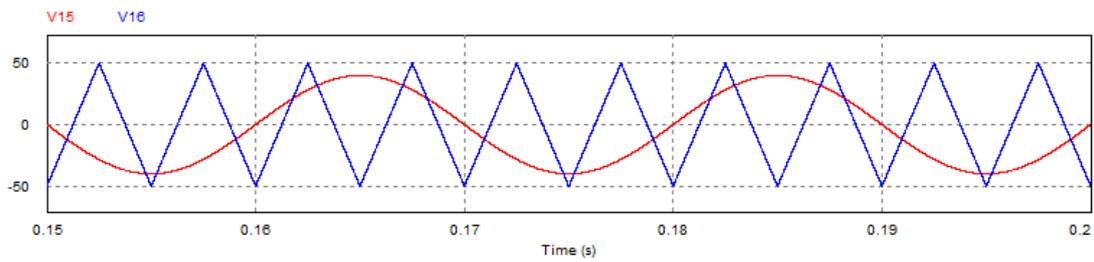


Figure III.7 Comparaison de la porteuse à la modulente

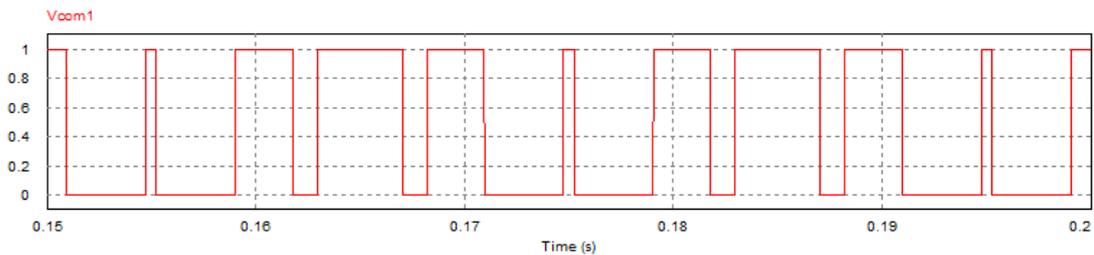


Figure III.8 Allure de la tension de sortie du comparateur

III.2.3 Convertisseurs du système de recharge de batterie par récupération

Pendant la phase du freinage ou de décélération, une partie de l'énergie cinétique du véhicule est récupérée puis convertie en énergie électrique afin de recharger la batterie qu'on appelle le freinage régénératif.

Cette énergie sera utilisée par la suite pour la traction du véhicule, cela permet de rallonger l'autonomie de la batterie.

Le système de récupération de l'énergie comprend les mêmes éléments que celui de la traction ; batterie, convertisseurs statique, machine électrique, sauf que dans ce cas le transfert de l'énergie se fait de la machine vers la batterie.

La machine électrique fonctionnant en génératrice alimente le redresseur avec des tensions alternatives, la tension de sortie du redresseur pour recharger la batterie en continu.

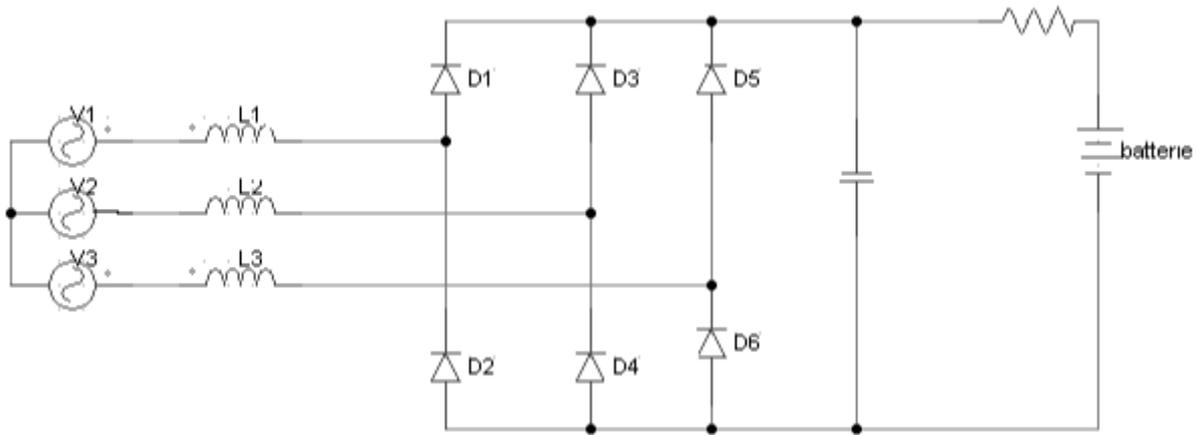


Figure III.9 Redresseur triphasée non commandé pour la recharge de batterie

Ce type de redresseur comporte trois diodes à cathode commune D1, D2 et D3 assurant l'aller du courant $i_R(t)$, et trois diodes à anode commune D4, D5 et D6 assurant le retour du courant $i_R(t)$. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$V_1(t) = V_m \sin(2\pi f t) \quad (\text{III.7})$$

$$V_2(t) = V_m \sin\left(2\pi f t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{III.8})$$

$$V_3(t) = V_m \sin\left(2\pi f t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{III.9})$$

Si l'effet de l'empîement est négligé, la valeur instantanée de la tension redressée peut être exprimée par :

$$U(t) = \max(U_1(t), U_2(t), U_3(t)) - \min(U_1(t), U_2(t), U_3(t)) \quad (\text{III.10})$$

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$U_{moy} = 3\sqrt{3} \frac{V_{max}}{\pi} \quad (\text{III.11})$$

L'énergie récupérer au freinage est faible c'est pour cela un hacheur élévateur et indispensable dans notre phase de récupération

III.2.4 Convertisseur du système auxiliaire

C'est pour l'alimentation des éléments auxiliaires tels que le chauffage, la climatisation, radio etc,...

Ce système utilise un convertisseur continu/continu de type abaisseur de tension car l'alimentation de ses éléments se fait à partir d'une batterie de 14V.

la tension d'entrée passe de 400 à 14V en sortie.

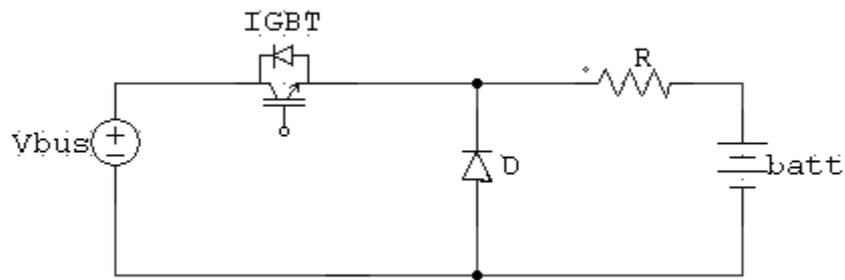


Figure III.10 hacheurs dévolteur (Buck)

$$\text{IGBT sera fermé, diode bloquée} \quad 0 \leq t \leq \alpha T \quad V_{ch} = E \quad (\text{III.12})$$

$$\text{IGBT bloqué et diode conduit} \quad \alpha T \leq t \leq T \quad V_{ch} = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$V_{chmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt \quad (\text{III.14})$$

$$V_{chmoy} = \alpha E \quad (\text{III.15})$$

La tension de sortie est ajustée en agissant sur le rapport cyclique α . Ce dernier étant variable entre 0 et 1 ce qui induit le montage varie entre 0 et E, donc c'est un abaisseur de tension.

III.3 Asservissement des convertisseurs

Normalement, les sources d'énergies électriques (SEE) se doivent d'être bien contrôlées par les convertisseurs via l'asservissement de leur courant ou de leur tension de sortie. Un convertisseur DC-DC doit maintenir la tension continue de sortie quelle que soit la et la tension d'entrée, et ceci même si les caractéristiques des composants du convertisseur évoluent avec le temps. Pour stabiliser cette tension de sortie, il existe deux stratégies de

Chapitre III Modélisations des convertisseurs de la chaîne de traction du véhicule électrique

commande. La première est constituée d'une boucle de contrôle de la tension (BCT) et la seconde de deux boucles de contrôle de la tension et du courant (BCTC) [42]. Dans notre étude on s'intéresse au contrôle de la boucle de la tension et du courant.

III.3.1 Boucles de contrôle de la tension et du courant (BCTC)

L'asservissement à boucles de contrôle de la tension et du courant (BCTC) est un système de contrôle muni d'une boucle externe lente et d'une boucle interne rapide. La boucle de tension (boucle externe) fournit la référence à la boucle de courant (boucle interne). L'utilisation d'une boucle de contrôle du courant permet de parfaitement maîtriser la référence de courant et donc le courant même pendant les phases transitoires (sous réserve d'utiliser un régulateur de courant à haute performance dynamique). Ce mode de contrôle est généralement utilisé en moyenne et forte puissances et est donc souvent associé à un mode de conduction continue du hacheur [43].

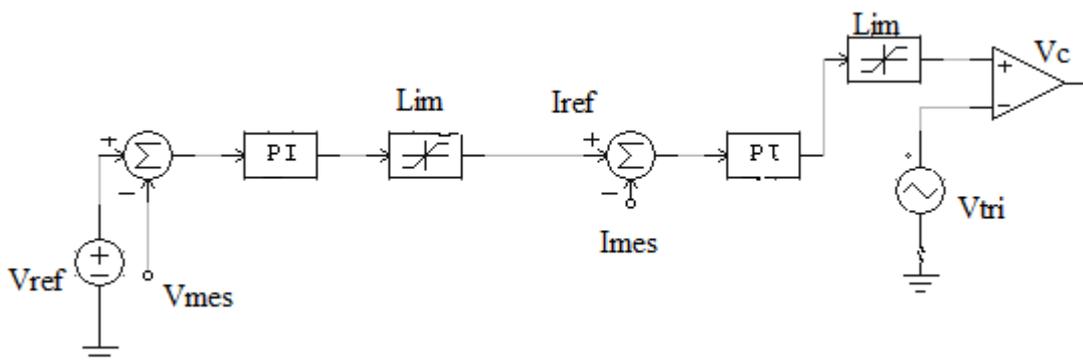


Figure III. 11 Boucle fermée de contrôle de tension et du courant

III.3.2 Contrôle linéaire des convertisseurs DC/DC

Différentes techniques sont couramment utilisées pour asservir un signal électrique à un signal de référence pour la commande des convertisseurs DC/DC. La technique dite MLI utilise des régulateurs linéaires (PI, PID...) ou non linéaires (glissant, entrée/sortie...) dont la sortie est une grandeur de commande continue. Cette sortie est alors comparée à un signal porteur. On obtient alors les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence du signal porteur fixe la fréquence de découpage à condition que les grandeurs de sorties des régulateurs évoluent lentement sur une période du signal porteur. Cette technique, facile d'utilisation, assure alors un fonctionnement à fréquence fixe, un contenu harmonique

Chapitre III Modélisations des convertisseurs de la chaîne de traction du véhicule électrique

parfaitement identifié mais possède aussi de par sa structure, des propriétés dynamiques limitées [43].

III.3.3 Les correcteurs (régulateurs) de base

III.3.3.1 Correcteur à action proportionnelle P

La relation entre la sortie $U(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$U(p) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{III.16})$$

C'est-à-dire
$$\frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p \quad (\text{III.17})$$

Avec K_p appelé « gain proportionnel ».

L'action proportionnelle entraîne une augmentation du gain, d'où une diminution de l'erreur statique (amélioration de la précision) mais, augmente la bande passante du système, ce qui améliore la rapidité du système et, augmente l'instabilité du système.

III.3.3.2 Correction à action Intégral

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est

$$\frac{dU(t)}{dt} = K_i \cdot \varepsilon(t) \quad (\text{III.17})$$

Ou encore
$$U(t) = K_i \int \varepsilon(t) \quad (\text{III.18})$$

C'est-à-dire
$$\frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{K_i}{s} = \frac{1}{T_i} \frac{1}{s} \quad (\text{III.19})$$

Avec K_i appelé « gain intégral », T_i appelé « constante de temps d'intégration ». L'action intégrale pure améliore la précision en réduisant ou annulant l'erreur statique, mais introduit un déphasage de -90° qui risque de déstabiliser le système. Le correcteur à action Intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au correcteur proportionnel.

III.3.3.3 Correcteur à action proportionnelle et intégrale PI

La relation entre la sortie $u(t)$ et le signal d'erreur $\varepsilon(t)$ est :

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int \varepsilon(t) dt \tag{III.20}$$

Ou encore,
$$\frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = k_p \left(1 + \frac{K_i}{s \cdot K_p} \right) = K_p \left(1 + \frac{1}{s \cdot T_n} \right) \tag{III.21}$$

Avec $T_I = \frac{1}{K_i}$ « constante de temps d'intégration » (III.22)

$$T_n = \frac{K_p}{K_i} \quad \text{« Dosage de corrélation d'intégrale »} \tag{III.23}$$

Ce correcteur sera utilisé chaque fois qu'une erreur permanente doit être annulée ou minimisée, c'est à dire une amélioration de la précision du système. En effet, il introduit une augmentation du gain global du système aux basses fréquences.

III.3.4 Calcul de paramètre du régulateur PI [44]

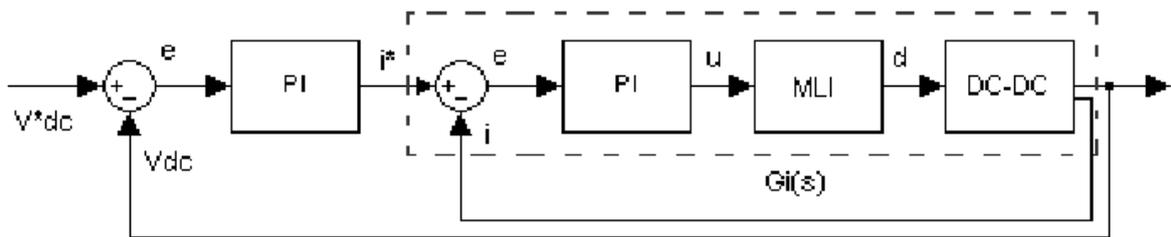


Figure III.12 Schéma du principe de régulation des convertisseurs

$$G(s) = G_{PI}(s) \cdot G_I(s) \tag{III.24}$$

Les fonctions $G_{PI}(s)$ et $G_I(s)$ sont données par :

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{1}{s \cdot T_i} \tag{III.25}$$

$$G_P(s) = \frac{1}{1 + s \cdot T} \tag{III.26}$$

En prenant $T_i = RC$ et $T = 0.8 RC$ la fonction

$$G(s) = \left(K_p + \frac{1}{s.T_i} \right) \left(\frac{1}{1+s.T} \right) \quad (\text{III.27})$$

$$G(s) = \frac{\frac{K_p}{T} \left(s + \frac{1}{T_i K_p} \right)}{s^2 + s \left(\frac{1+K_p}{T} \right) + \frac{1}{T T_i}} \quad (\text{III.28})$$

L'identification de l'équation de deuxième ordre $s^2 + 2\rho\omega s + \omega^2$ est :

$$\omega^2 = \frac{1}{T T_i} \quad (\text{III.29})$$

$$K_p = 2\zeta \omega T - 1 \quad (\text{III.30})$$

III.4 Présentation de la Machine synchrone à aimant permanent (MASP)

III.4.1 Principe de fonctionnement

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [45].

- Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [46].
- Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique.

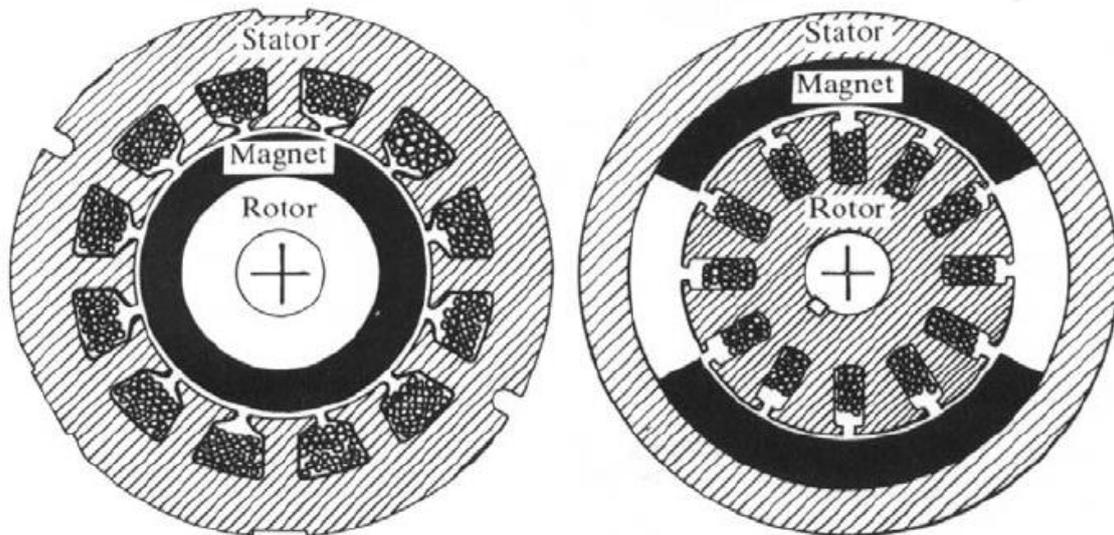


Figure III.13 Comparaison des structures des machines synchrones et à courant continu [47]

III.4.2 Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines :

- ✓ Puissances massiques élevées.
- ✓ Absence de contacts glissants.
- ✓ Un bon rendement
- ✓ Absence des balais et d'alimentation continue.
- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- ✓ Fonctionnement en survitesse.

Cette machine est donc bien indiquée pour les systèmes embarqués et peut être employée pour des systèmes de faible puissance (petits moteurs) ou de puissance plus importante (jusqu'à quelques dizaines de MW en fonctionnement moteur).

III.4.3 Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on cite

- ✓ Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.
- ✓ Ondulations de couple [37].

III.5 Conclusion

Les convertisseurs d'électronique de puissance occupent majoritairement la chaîne de traction, ils assurent la conversion d'énergie entre les différents étages du VE. Quant à la machine synchrone à aimants permanents assure la conversion électromécanique (réversible en énergie), elle est souvent associée à un convertisseur électronique afin d'assurer son démarrage qui est appelé l'autopilotage de la machine.

IV.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré pour la simulation des différents montages constituant la chaîne de traction du véhicule, pour ce faire on a utilisé un logiciel de simulation Power Sim dit (PSIM), développé par la société canadienne, spécialement conçu pour être utilisé dans les simulations d'électronique de puissance et de motorisation.

Pour expliquer le fonctionnement du véhicule électrique nous allons le diviser en 4 systèmes principaux qui sont :

- ❖ Le système de charge du véhicule (chargeur de batterie).
- ❖ Le système de traction du véhicule (fonctionnement moteur).
- ❖ Le système de récupération d'énergie par freinage récupératif (fonctionnement générateur).
- ❖ Le système auxiliaire.

IV.2 Simulation du chargeur de batterie

Le schéma général du chargeur de batterie est présenté dans la figure

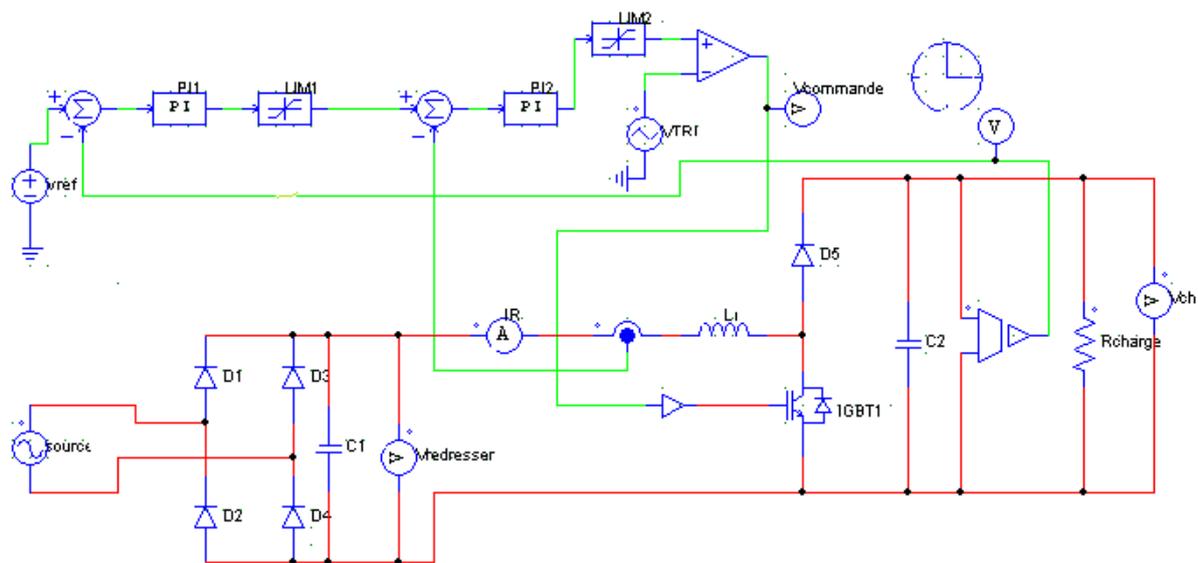


Figure IV.1 Chargeur de batterie

- **Tension du réseau**

C'est une tension alternative de fréquence 50 HZ et de valeur maximale 311V.

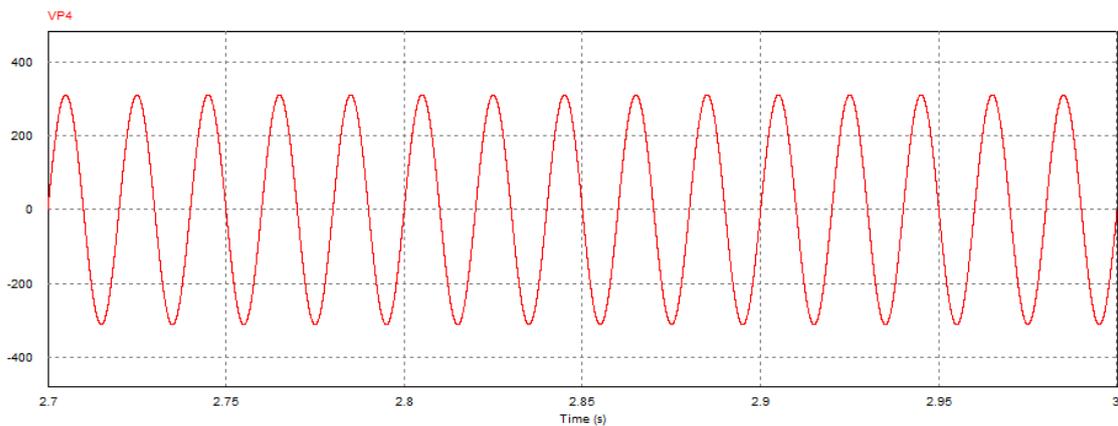


Figure IV.2 Tension réseau

- **Tension redressée**

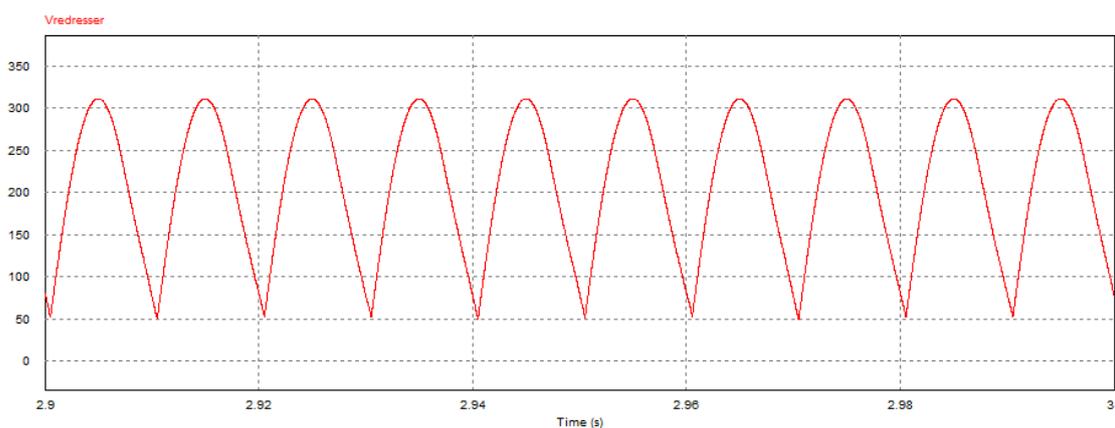


Figure IV.3 Tension redressée

La plupart des circuits électroniques nécessitent une tension d'alimentation continue, pour lisser cette tension il faut utiliser un condensateur de filtrage qui assure une réserve d'énergie lorsque la tension issue du pont devient faible c'est alors lui seul qui alimente le circuit.

Avec le condensateur de filtrage en aura l'allure suivante :

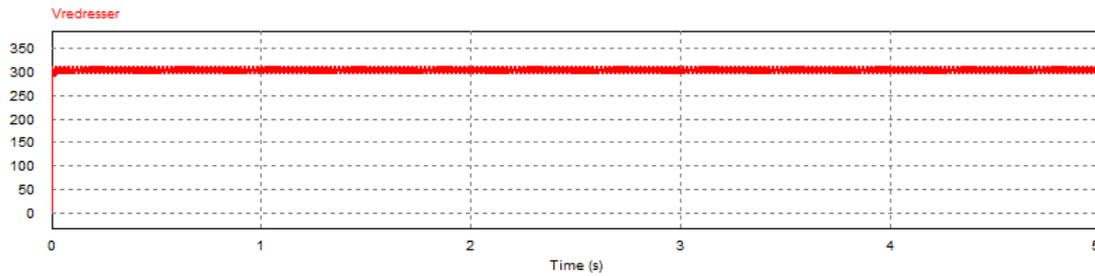


Figure IV.4 Allure de la tension filtrée

Pour la recharge de la batterie il faut que la tension d'entrée soit supérieure à la tension du pack c'est pour cela un autre convertisseur est obligatoire qui est le DC/DC. Le circuit de régulation permet de fixer le signal de commande afin d'obtenir une tension désirée en sortie.

Concernant le circuit régulation le principe est de fixé la tension de charge tout en régulant le courant de charge de batterie.

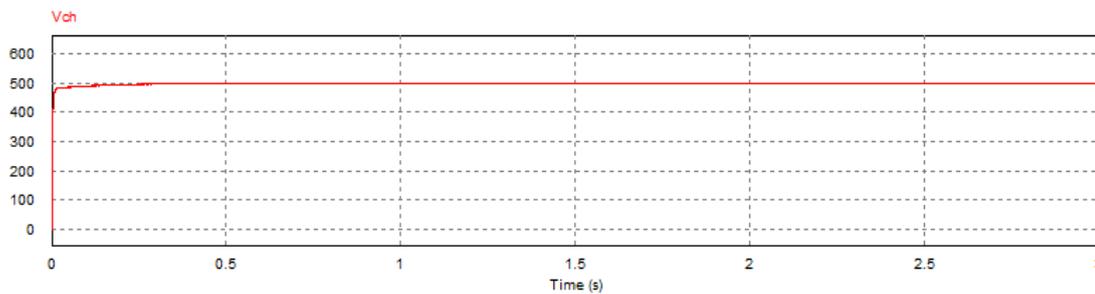


Figure IV.5 Allure de tension de charge de la batterie

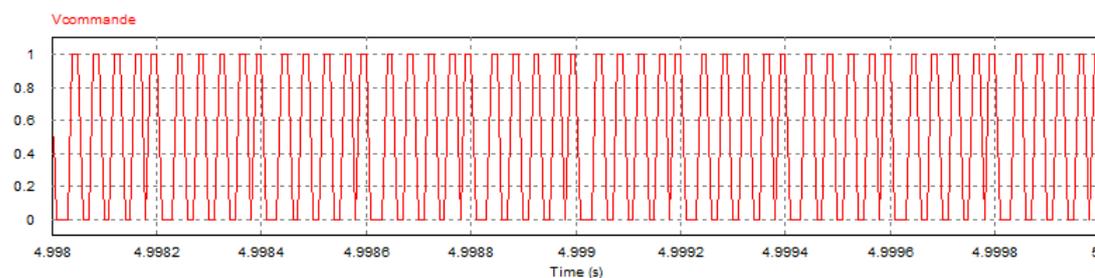


Figure IV.6 Allure du signal de commande

Discussion des résultats

La régulation permet de fixer la tension de charge en sortie pour qu'elle soit toujours supérieure à celle de la batterie et avoir un courant de charge positif. En faisant varier la résistance de charge le courant de charge varie quant à lui aussi.

Remarque : la variation de la résistance est une simulation pour montrer que la recharge de batterie peut se faire par des courants d'intensités différentes.

IV.3 simulation du système de traction du véhicule

La batterie alimente l'onduleur de tension qui à son tour alimentera la machine.

La tension du bus est fixée à 500V à partir d'un hacheur élévateur comme montré dans la figure IV.7

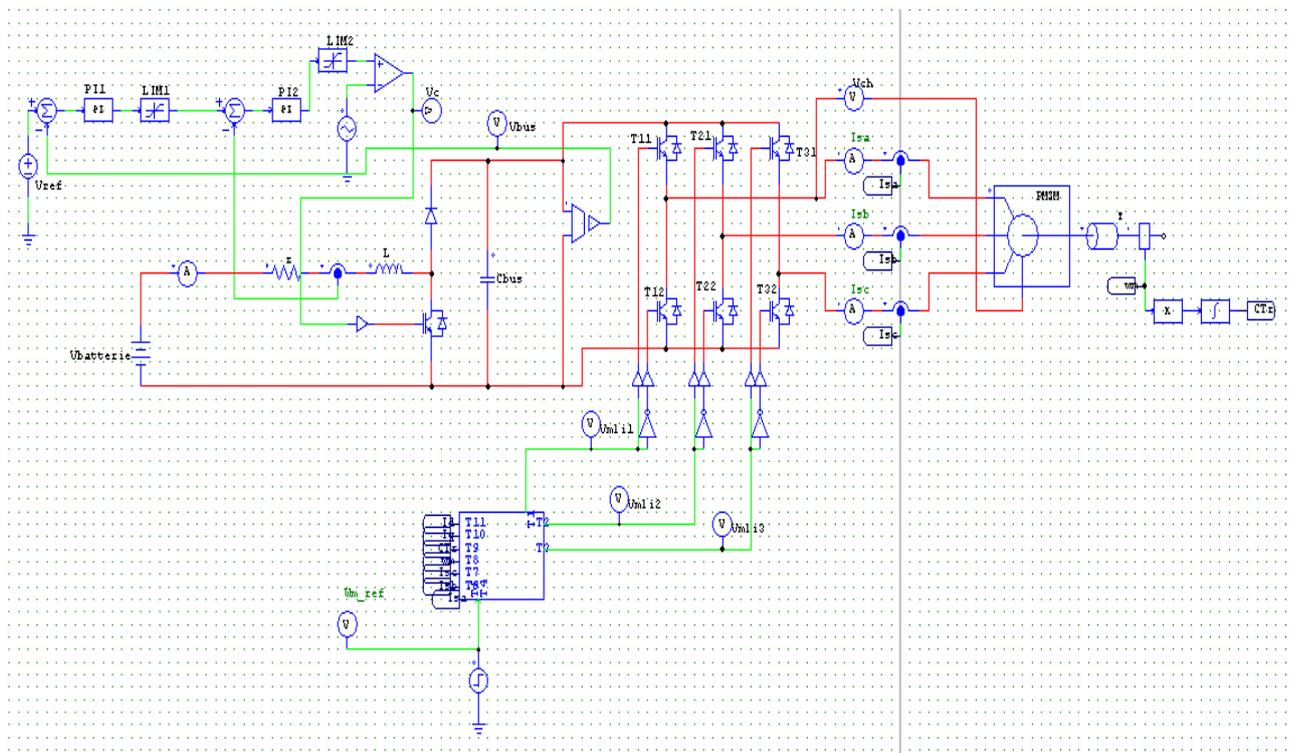


Figure IV.7 Schéma système de traction du véhicule

Pour comprendre le fonctionnement de ce système, on commence d'abord par la simulation du moteur à vide (sans charge), par la suite on lui applique un couple résistant qui va le freiner et on simulera les résultats.

IV.3.1 Simulation du moteur à vide

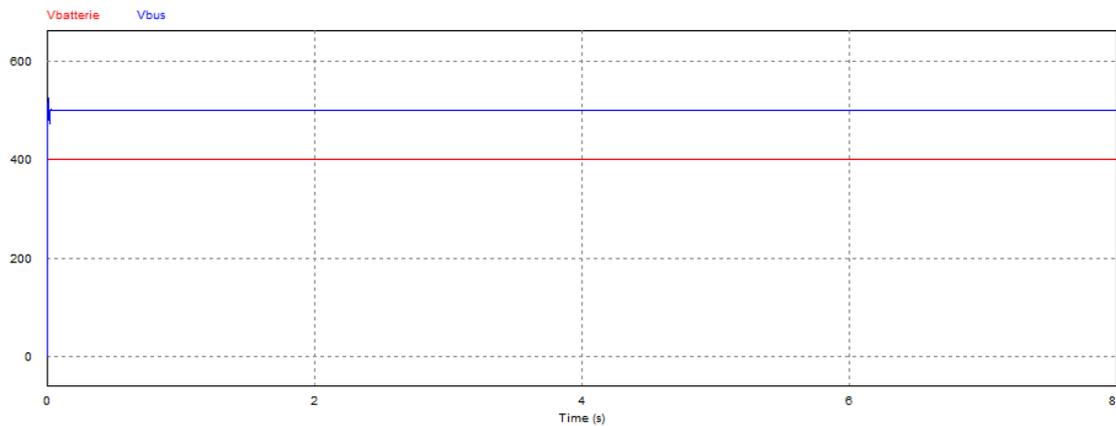


Figure IV.8 Tension du bus et celle de la batterie

Le circuit intégré est fait pour la génération des signaux MLI pour la commande de l'onduleur et l'autopilotage de la machine. On aura trois signaux de commande décalé de 120 degré (comme montré dans la figure IV.9).



Figure IV.9 Signaux de commande de l'onduleur

A la sortie de l'onduleur on aura des courants triphasés sinusoidales de valeur très faible car le moteur est simulé à vide (sans charge) (figure IV.10), par contre la tension de charge de l'onduleur reste fixe quelque soit la variation du courant (voir la figure IV.11).

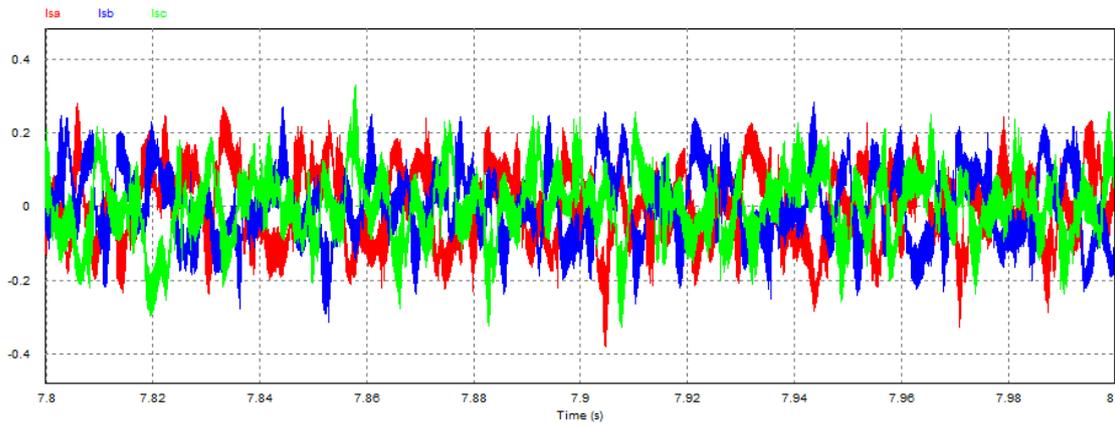


Figure IV.10 Courant consommé par le moteur

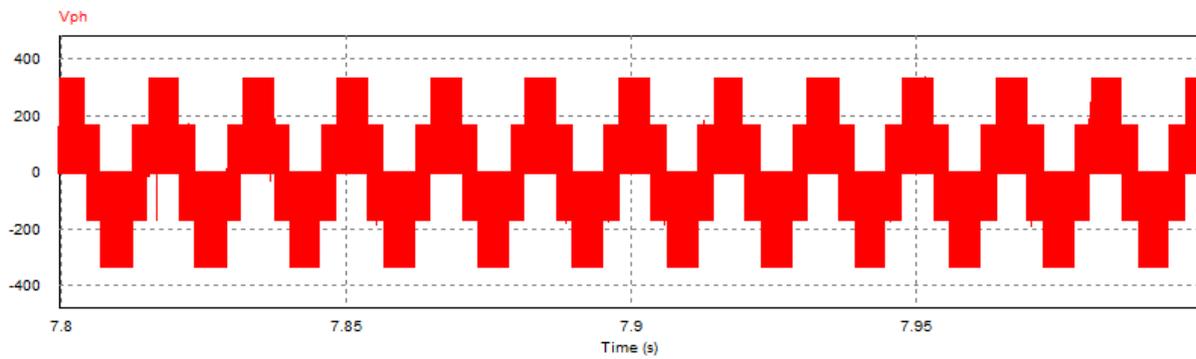


Figure IV.11 Tension de phase de l'onduleur

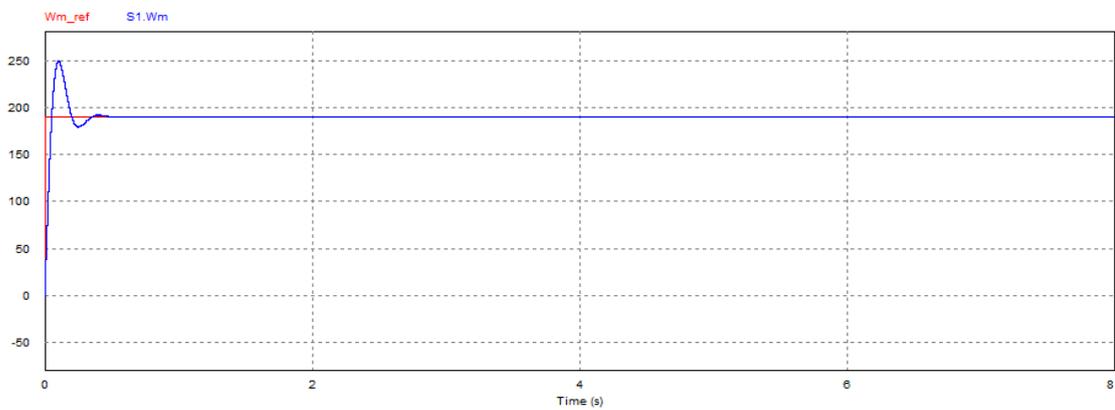


Figure IV.12 Vitesse du moteur

la vitesse du moteur est fixée par le Step et régulé de manière à avoir à chaque fois la vitesse désirée. (Voir annexe I)

IV.3.2 Simulation du moteur avec charge

- Avec couple résistant de 2 N.m

Avec cette charge, On remarque que les courants de sortie de l'onduleur atteint 2.5A.

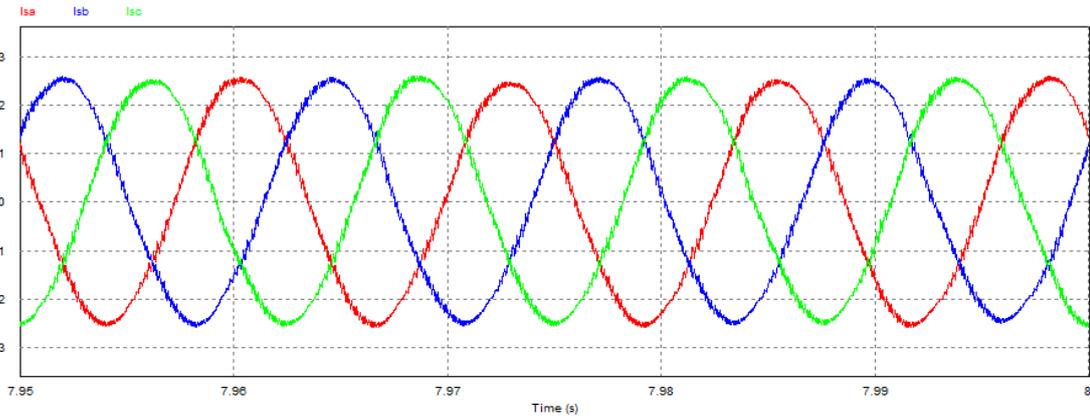


Figure IV.13 Courants de sortie de l'onduleur

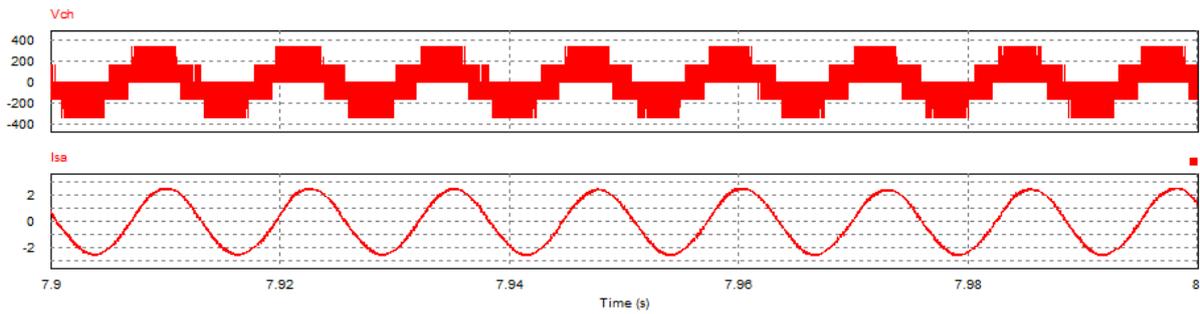


Figure IV.14 Courant et tension de phase de l'onduleur

Pour une vitesse de référence de 170 rad/s et un couple constant en sortie de 2 N.m on remarque que la vitesse suit la consigne et le courant demandé à la batterie est d'une moyenne de 1.01A.

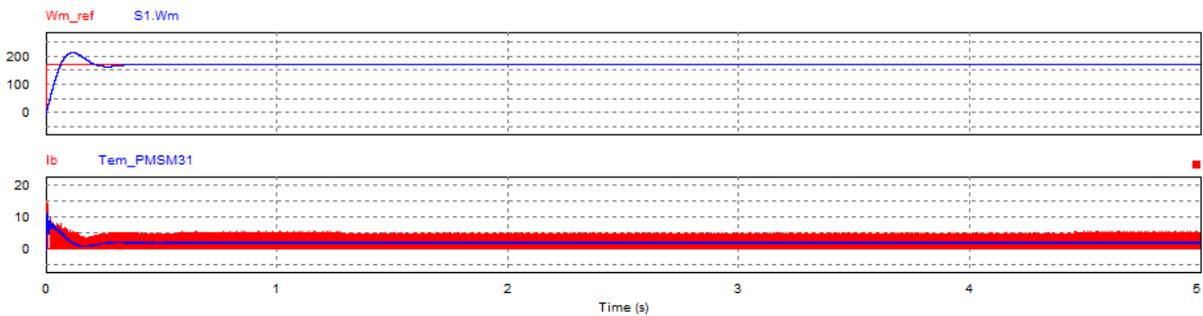


Figure IV.15 Courant fourni par la batterie et la vitesse en fonction de la charge (2 N.m)

- Avec un couple résistant de 6 N.m

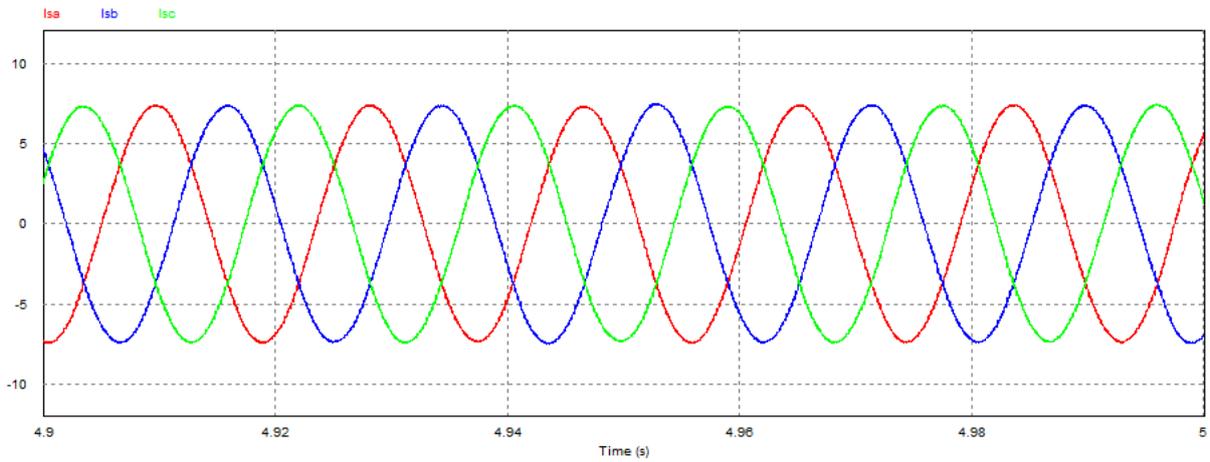


Figure IV.16 Courants de sortie de l'onduleur

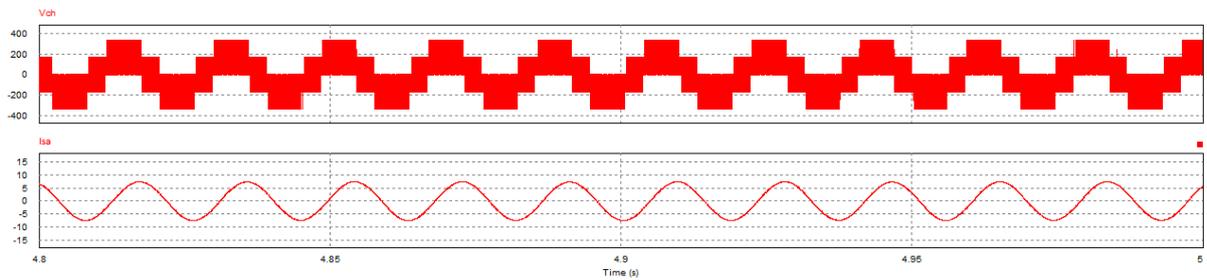


Figure IV.17 Courant et tension de phase de l'onduleur

Pour une vitesse de référence de 170 rad/s et un couple constant en sortie de 6 N.m on remarque que la vitesse suit toujours la consigne et le courant demandé à la batterie est d'une moyenne de 3.64 A (Figure IV.18).

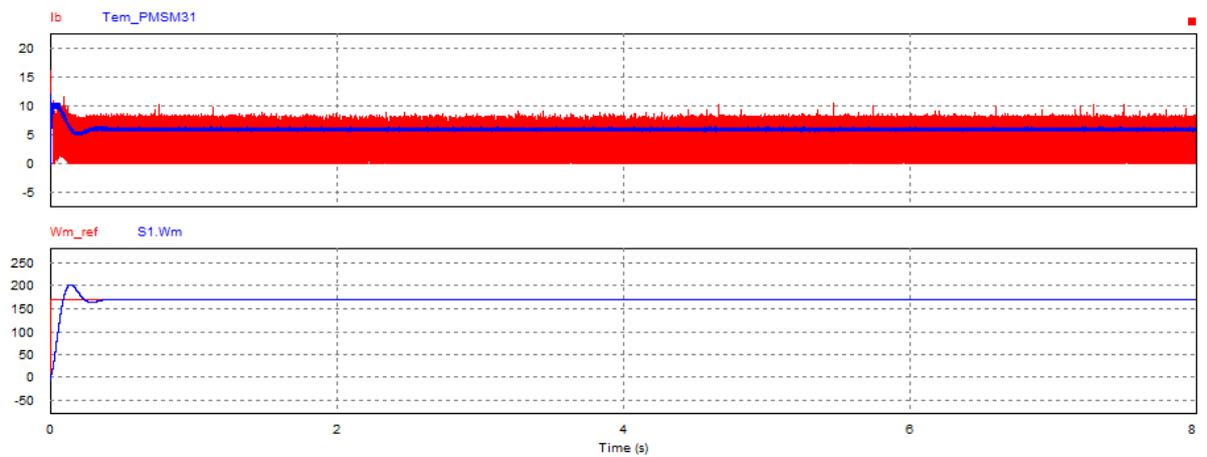


Figure IV.18 Courant fourni par la batterie et la vitesse en fonction de la charge (6 N.m)

La moyenne du courant qui définit le couple de freinage est celle mesurée dans régime permanent $I_{ch} = 36.15 \text{ A}$.

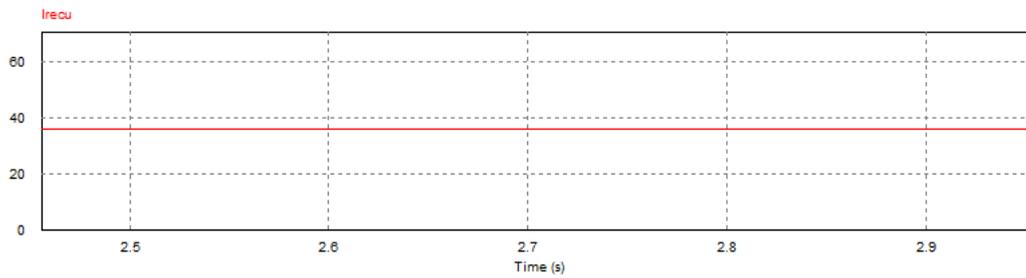


Figure IV.21 Courant définissant le couple de freinage

- Pour $I = 3.5 \text{ A}$

Le courant aux bornes de la résistance de charge :

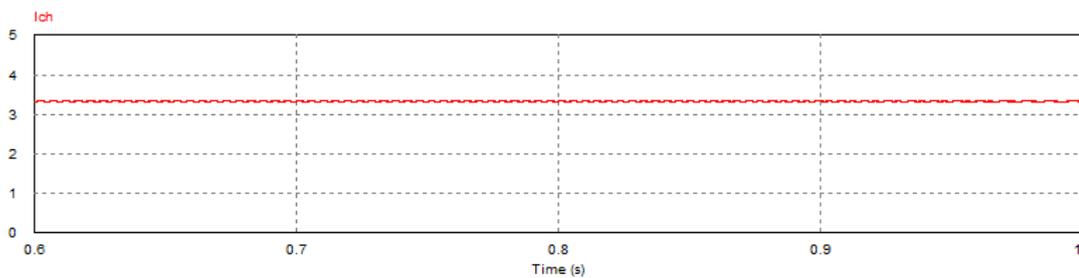


Figure IV.22 Allure de courant récupéré au freinage

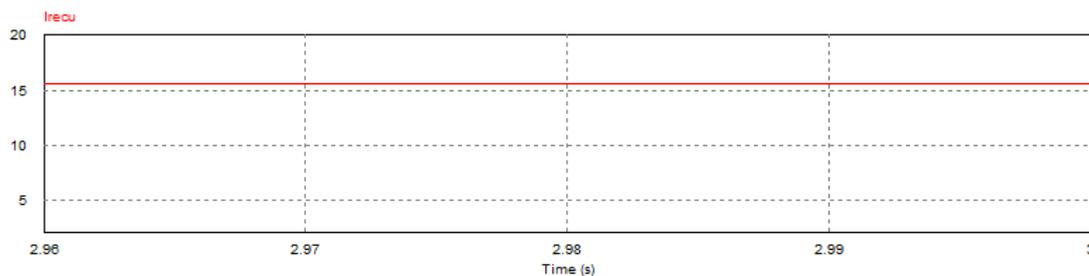


Figure IV.23 Allure du Courant définissant le couple de freinage

Un autre moyen de visualiser les cas de freinage, montré dans la figure IV.24

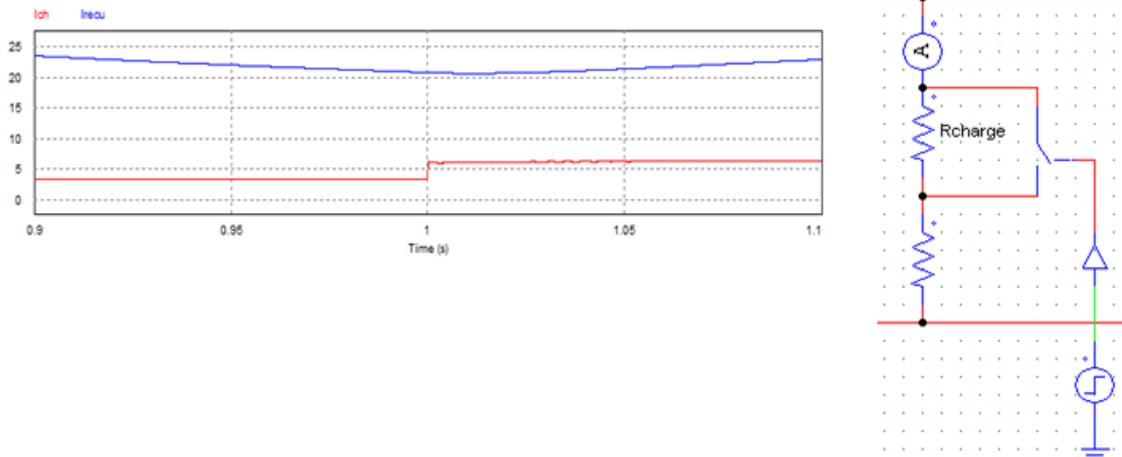


Figure IV.24 Profil du freinage

Discussion des résultats

D’après les résultats obtenu pour différents cas du freinage on constate qu’à chaque fois que le courant fournit à la batterie est important, le courant consommé par le MCC (freinage) est important.

IV.5 Simulation des systèmes auxiliaires

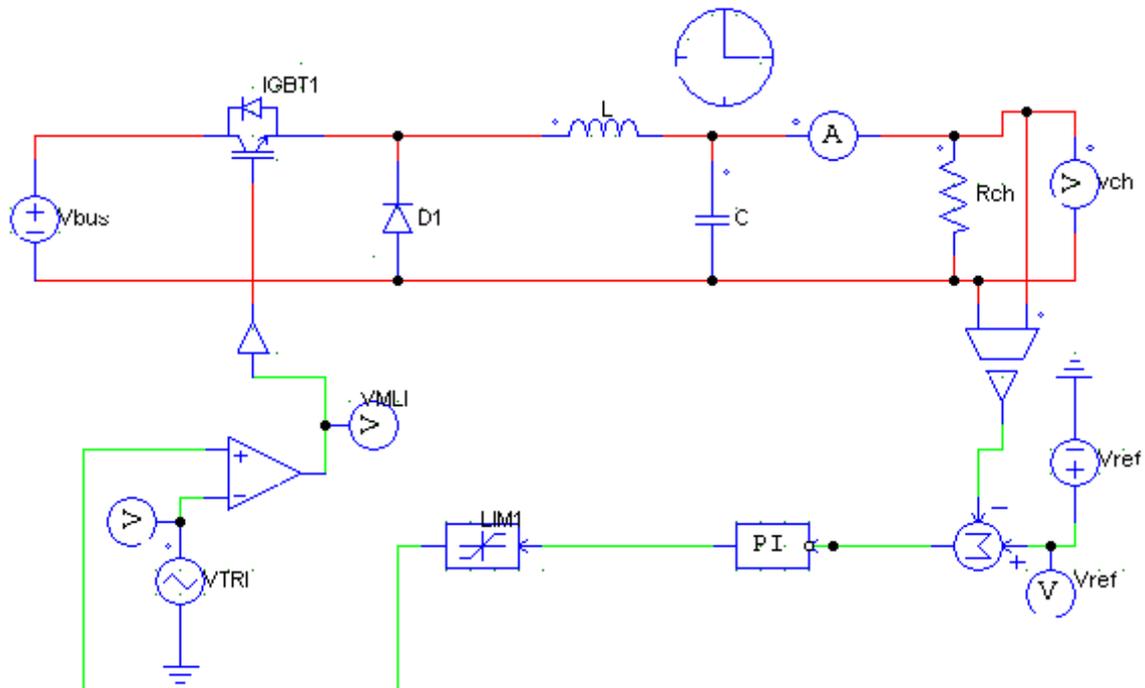


Figure IV.25 Circuit d'alimentation des auxiliaires

Pour l'alimentation des circuits auxiliaires comme (l'éclairage, chauffage...), il faudra baisser la tension de bus à 14 V. Cela se fait par un circuit de commande (régulation) pour maintenir la tension désirée.

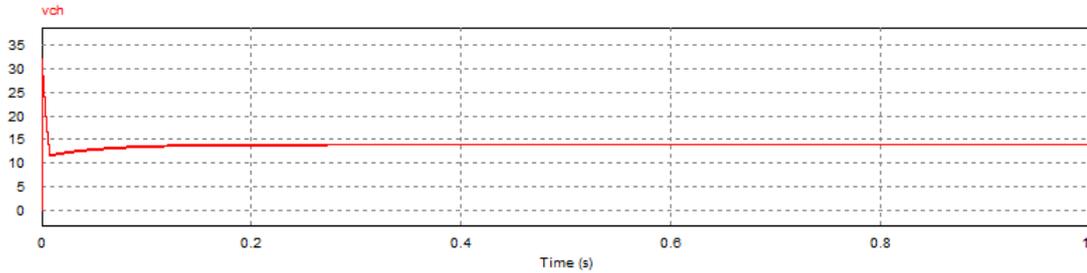


Figure IV.26 Allure tension de charge batterie (14V)

IV.6 Simulation du profil du VE

Le schéma est donné dans la figure IV.27

Ce profil peut être développé en utilisant un échelon à deux niveaux, on suppose que le véhicule roule à une vitesse précise pour un temps donné, par la suite on passe à une vitesse inférieure pour simuler le freinage du véhicule. Pour le passage d'une vitesse de 100 rad/s à 80 rad/s, les résultats sont présentés dans la figure IV.28

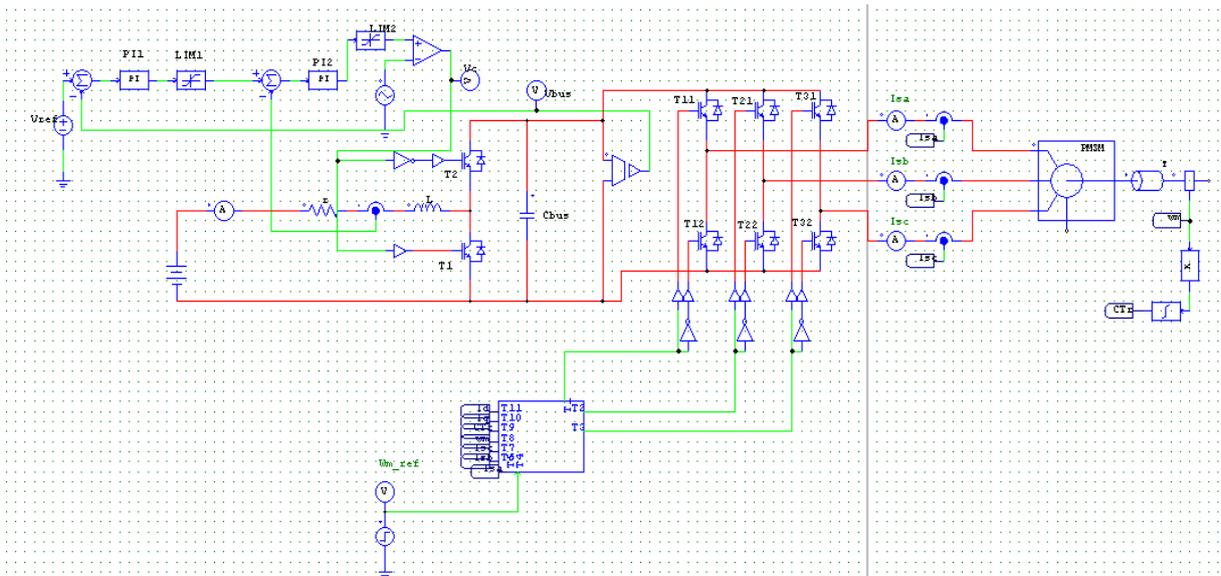


Figure IV.27 Simulation du comportement du véhicule

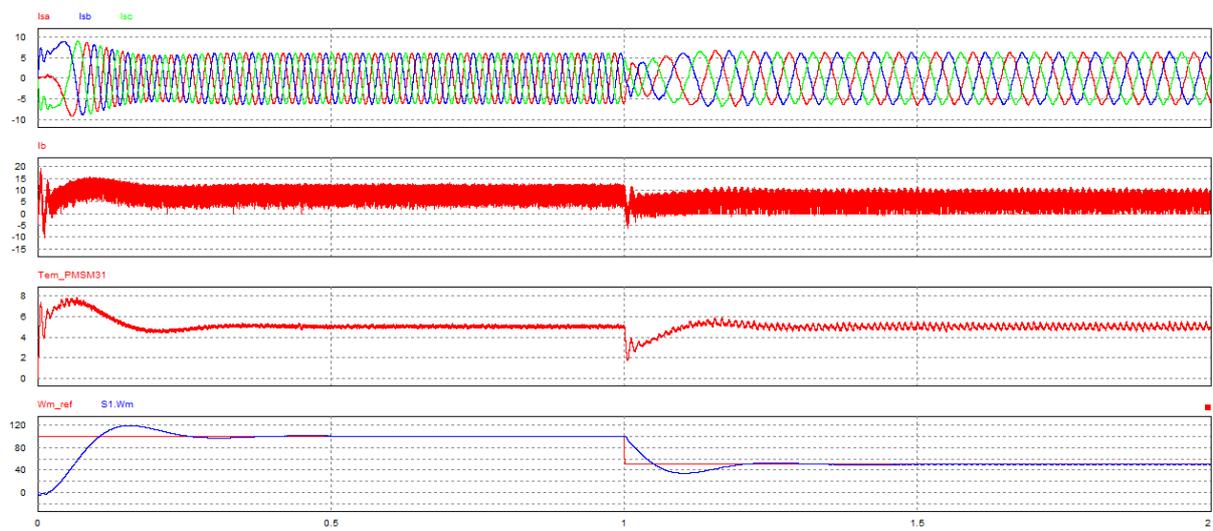


Figure IV.28 Profil de la vitesse, courant et couple

On remarque que de 0 à 1s, la vitesse suit la consigne (80 rad/s) le couple est positif et le courant fourni par la batterie est positif.

A l'instant de freinage $t=1s$, la vitesse de consigne passe à 50 rad/s, à cette instant le couple est négatif et le courant sera récupérer par un hacheur réversible en courant pour la recharge de la batterie.

Sauf que cet état ne durera pas longtemps puisque la consigne passe instantanément de 80 à 50 rad/s et se stabilise à cette dernière tension.

IV.7 Conclusion

D'après les résultats de la simulation des différents montages on conclut que :

- La recharge de batterie est un point important dans un véhicule électrique, le courant de charge dépend fortement du type de chargeur, plus le courant de charge est grand plus la recharge est rapide, mais c'est la recharge lente qui est recommandée car elle assure une recharge complète du véhicule.
- Une mauvaise conduite peut avoir un effet négatif sur la batterie affectant ainsi son autonomie
- Plus le couple de freinage est important plus le courant récupéré est important.

Conclusion générale

L'augmentation des prix du pétrole n'est en aucun cas une raison de passage de l'énergie thermique vers l'énergie électrique. Il faut savoir que l'énergie électrique consommée par le VE est produite à partir des centrales (thermique ou nucléaire) qui sont responsables de la pollution et l'émission des gaz à effets de serre. Quant au VE lui-même n'a aucun impacte nocif sur l'environnement lors de son utilisation, contrairement au véhicule thermique.

La plus grande force de cette catégorie repose sur la nature électrique de son moteur, à la fois pour des raisons technique car ils sont plus souples que les moteurs thermiques et ont un meilleur rendement, mais aussi pour des raisons sociétale. Ainsi la motorisation électrique est un sujet bien maîtrisé. Les principaux problèmes vont des conditions de production de l'énergie électrique aux différents couts de la voiture et sur tout au stockage embarquée de l'énergie.

Comme perspectives, dans notre travail on s'est basé sur la simulation du comportement du véhicule uniquement dans les deux quadrants couple/vitesse, et ce qu'on suggèrerait aux futurs étudiants travaillant dans ce projet est d'étudier les deux autres quadrants afin de simuler un comportement réel du véhicule.

Le VE est donc un moyen de transport qui occupera certainement une place de plus en plus importante dans les grandes villes surchargées de véhicules et polluées, mais il faudrait pour cela :

- ✓ Améliorer l'autonomie en développant des batteries avec des capacités de stockage d'énergie plus grande.
- ✓ Optimiser le temps de charge, en développant des infrastructures permettant de charger les batteries en un temps minimal.
- ✓ Dans les années à venir, la demande de l'énergie électrique va augmenter avec la généralisation du VE pour cela. Il est donc essentiel d'anticiper la problématique de la recharge des batteries et celle de la production de l'énergie électrique.
- ✓ Et enfin, la recharge du VE devrait se faire à partir d'une source d'énergie renouvelable (solaire, hydraulique, éolienne, etc...) même si les facteurs de climats sont aléatoires, ce qui permettrait de diminuer la consommation du pétrole et par conséquent limiter la production de l'électricité à partir des centrales.

Pour conclure, malgré les nombreuses recherches effectuées sur la chaîne de traction et les batteries, le véhicule électrique n'est encore qu'au stade expérimental, et est à sujet de modification ou à amélioration.

Le courant consommé par le moteur pour une vitesse de 250 rad/s.

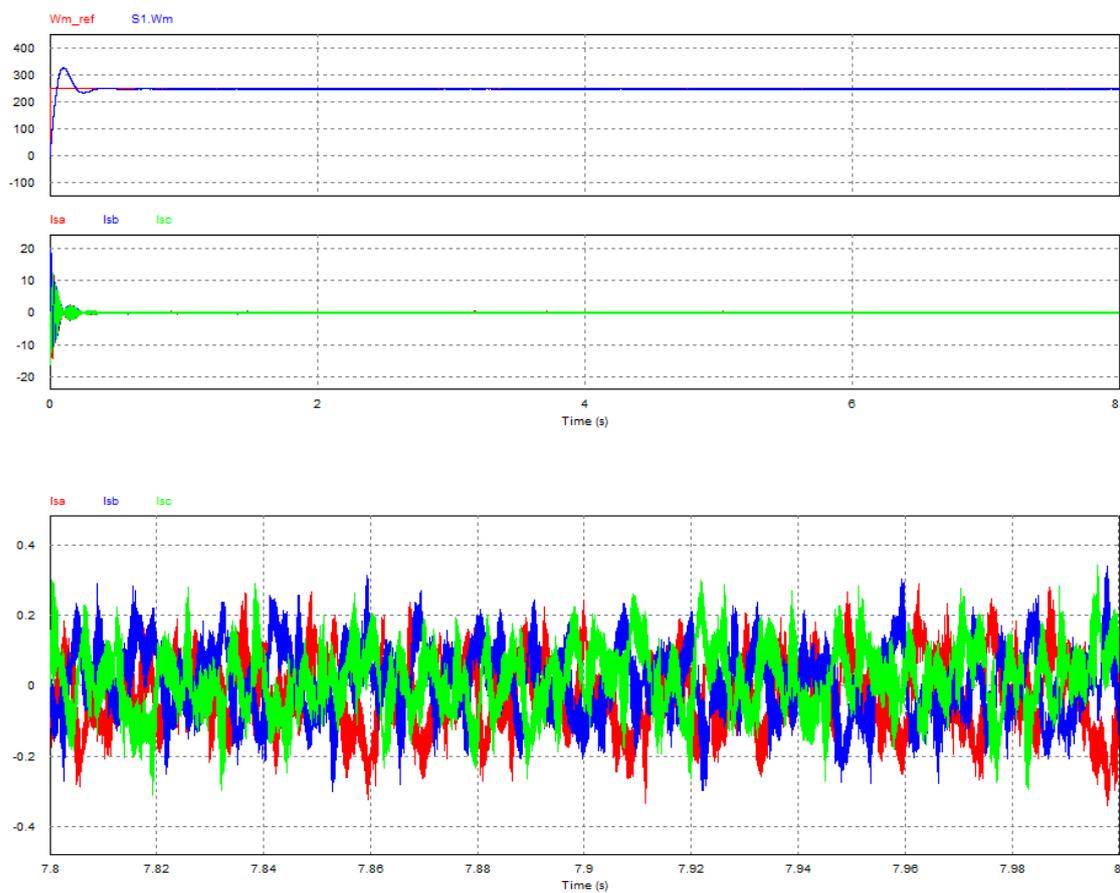


Figure IV.29 Vitesse et courant consommé par le moteur pour une référence de 250 rad/s

- [1]: Bertrand Chauchat. *Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique*. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1997. Français.
- [2]: Boucha Abdellah. *Réalisation et commande d'un véhicule électrique par dSpace embarquée*. Thèse doctorat en automatique, USTO.
- [3]: *Voiture électrique: histoire et avenir*. (18/10/2016). Disponible sur <https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/technologie-voiture-futur-685/page/13/>. Consulté le 11 mars 2019.
- [4]: Samantha Lacroix. *Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries*. Autre [cond-mat.other]. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. Français. <NNT : 2013PA112074>. <tel-00836751>.
- [5]: *L'histoire de la voiture électrique*. (s.d). Disponible sur <http://voiture-electrique.durable.com/a-l-histoire-de-la-voiture-electrique>. Consulté le 11 mars 2019.
- [6]: AVERE France. *l'histoire du véhicule électrique*. (30 novembre 2014). Disponible sur http://www.aver-france.org/Site/Article/?article_id=5871&from_espace_adherent=0. Consulté le 14 mars 2019.
- [7]: *La voiture électrique est-elle vraiment la solution du futur ?* (s.d.). Disponible sur <https://sites.google.com/site/waag78/la-voiture-dans-son-utilisation/utiliser-une-voiture>. Consulté le 10 mars 2019.
- [8]: Yannick Brossard, Renault. (16 octobre 2017). *Recharge d'un véhicule électrique Renault Kangoo Z.E*. Disponible sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/voiture-electrique>. Consulté le 15 mars 2019.
- [9]: *Voiture électrique*. (s.d.). Disponible sur <http://www.avem.fr/voiture-electrique.html>. Consulté le 18 mars 2019.
- [10]: Matthiew Legoug. (22 novembre 2018). *Une startup chinoise déploie la 1ère ligne de production de batteries solid state*. Disponible sur <https://www.clubic.com/energie-renouvelable/actualite-847624-startup-chinoise-deploie-1ere-ligne-production-batterie-solid-state.html>. Consulté le 20 mars 2019.
- [11]: Nabil Bourassi. (7 juin 018). *Bientôt, la révolution des batteries solides*. Disponible sur <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/automobile/bientot-la-revolution-des-batteries-solides-780986.html>. Consulté le 23 mars 2019.
- [12]: Destiny Conscience Eland Loukakou Bounzeki Mbemba. *Modélisation, conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains*. Autre. Université de Franche-Comté, 2012. Français. <NNT : 2012BESA2006>. <tel-00947630>.
- [13]: Roman shmitz. Juin 2007. *La voiture électrique comme alternative réaliste à la voiture à essence*. Disponible sur <http://www.romanschmitz.com/VE.pdf>. Consulté le 25 mars 2019.
- [14]: Murat Yilmaz. *Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid vehicles*. IEE transactions on power electronics, vol.28, no. 5 mai 2013.

- [15]: *Généralités sur les machines électriques-(chapitre2)*. Disponible sur <http://fuuu.be/polytech/ELECH300/CHAP2-ELEC-H-300.pdf>. Consulté le 04 avril 2019.
- [16]: Vido Lionel. *Etude d'actionneurs électriques à double excitation destinés au transport. Dimensionnement de structures synchrones*. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2004. Français. <tel-00477166>.
- [17]: MDP. *Technologie courant continu (DC)*. Disponible sur <https://www.mdp.fr/documentation/lexique/courant-continu/definition.html>. Consulté le 10 avril 2019.
- [18]: Biskri Zakaria, Itatahine abdessalam. *Etude et dimensionnement d'un moteur synchrone à aimant permanent à rotor intérieur pour application : véhicule*. Projet de fin d'étude (master), électrotechnique, université de khemis Miliana, 2015.
- [19]: *Moteur synchrone et asynchrone : quelle différence ?*.(16 février 2018). Disponible sur <https://www.motac.fr/blog/2018/02/16/moteur-synchrone-et-asynchrone-quelles-differences>. Consulté le 17 avril 2019.
- [20]: Olivier Briat. *Performances et fiabilité du stockage d'énergie pour le véhicule électrique et hybride*. Electronique. Université de Bordeaux, 2016. fftel-01657717.
- [21]: *Voiture électrique, avantages et inconvénients*. (s.d.). Disponible sur <https://www.les-voitures-electriques.com/guide/voiture-electrique-avantages-inconvenients/>. Consulté le 25 avril 2019.
- [22]: Jonas Moerman. (17 janvier 2017). *Voiture, mobilité et transport*. Disponible sur <https://www.ecoconso.be/fr/content/voiture-electrique-ses-avantages-et-inconvenients> . Consulté le 07 mai 2019.
- [23]: *Les inconvénients du véhicule électrique*. (s.d.). Disponible sur <http://www.avem.fr/index.php?page=ve&cat=inconvenients>. Consulté le 10 mai 2019.
- [24]: Ooreka. (s.d.). *Batterie de voiture électrique*. Disponible sur <https://entretien-voiture.ooreka.fr/astuce/voir/511041/batterie-de-voiture-electrique>. Consulté le 15 mai 2019.
- [25]: Destiny Conscience Eland Loukakou Bounzeki Mbemba. *Modélisation, conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains*. Autre. Université de Franche-Comté, 2012. Français. <NNT : 2012BESA2006>. <tel-00947630>.
- [26]: An Li. *Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides*. Energie électrique. Université Claude Bernard - Lyon I, 2013. Français. <NNT : 2013LYO10021>. <tel01157751>.

- [27]: Boutte Aissa. *Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques*, thèse doctorat, USTO-MB, 2015.
- [28]: *Les différentes technologies de batteries pour voitures électriques*. (s.d.). Disponible sur <http://voiture-electrique.durable.com/a-les-differentes-technologies-de-batteries-pour-voitures-electriques>. Consulté le 11 mai 2019.
- [29]: B.Aublin STI2D EE DIJON. (s.d.). *Comparatif de types de batteries*. Disponible sur <http://www.fltsi.fr/sti2d/ter/ressources/Stockage%20energie/Comparaison%20batteries.pdf>. Consulté le 29 avril 2019.
- [30]: Samantha Lacroix. *Modélisation et commande d'une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries*. Autre [cond-mat.other]. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. Français. <NNT: 2013PA112074>. <Tel-00836751>.
- [31]: Alexandre Ravey. *Design and control strategy of powertrain in hybrid electric vehicles*. Other [cond-mat.other]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2012. English. <NNT : 2012BELF0192>. <tel-00863541>.
- [32]: Nicolas Allali. *Convertisseurs haut rendement à dimensionnement réduit pour batterie hybridée puissance/énergie du véhicule électrique : principe de source de courant contrôlée*. Thèse doctorat, génie électrique, Centrale de Lille, 12 décembre 2016.
- [33]: Mamadou Bailo Camara Camara. *Supercondensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride : Modélisation, étude des convertisseurs et commande*. Thèse doctorat, université de Franche-Comté, 2007.
- [34]: Aakarmi Ayoub, Aqachmar Zakaria. *Modélisation de la batterie au lithium et système de gestion de la batterie*. Rapport de fin d'étude (master), génie électrique. Université sidi Mohammed ben Abdellah, 8 juin 2017.
- [35]: Akram Eddahech. *Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride*. Autre [cond-mat.other]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013. Français. <NNT : 2013BOR14992>. <tel-00957678>.
- [36]: Mounir Merzouk. *Développement de chargeurs intégrés pour véhicule hybrid plug-in*. Thèse doctorat, génie électrique, université de Grenoble Alpes, 8 octobre 2015.
- [37]: Senhadji Nawel, Chalabi Ammaria. *Commande de la machine synchrone à aimants permanents par backstepping*. Mémoire de fin d'étude (master), électrotechnique, université de Tlemcen, 14 juin 2015.
- [38]: *Bornes de recharge pour véhicule électrique*. Disponible sur http://www.sigma-tec.fr/elec/informations-techniques-calculs-bornes-recharge-vehicule-electrique.html#tag_4. Consulté le 22 avril 2019.

[39]: Abdeljalil Danone. *Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à double excitation pour véhicules hybrides*. Energie électrique, université de Grenoble, 2012.Français. <tel-00785862>.

[40]: M-TECH ENERGY bvba. *Cours technique sur la correction du facteur de puissance*. Disponible sur <https://docplayer.fr/3894352-Cours-technique-sur-la-correction-du-facteur-de-puissance.html>. Consulté le 25 mai 2019.

[41]: Haroune Aouzellag. *Optimisation de la gestion d'énergie des véhicules hybrides*. Thèse doctorat, électrotechnique, université de Bejaia, 12 janvier 2017.

[42]: Adjimi Nadia, Belaidi wahiba, *modélisation et commande d'un onduleur MLI*. Mémoire master, université Larbi Ben M'hidi, 2009.

[43]: ACHOUR Abderraouf. *Analyse et commande d'un hacheur buck-boost*. Mémoire master, université Mohamed Khider de Biskra, juin 2018.

[44]: Spirov Dimitar, Lazarov Vladimir, ROYE Daniel, Zarov Zahari, Mansouri Omar. *Modélisation des convertisseurs statiques DC-DC pour des applications dans les énergies renouvelables en utilisant Matlab/Simulink*. Université Technique de Sofia, 8 Kliment Ohridski, Sofia 1000, Bulgari, septembre 2009.

[45]: M.Oubidar, S.Bendaoud. *Machine Synchrone/Asynchrone*, Projet de fin d'étude (master) en ingénierie, université du Québec en Abitibi- Témiscamingue, 2010.

[46] : M.S.Mahgoun. *Application De La Commande Aux Systèmes Linéaires Perturbés*. Mémoire de Magister, université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), 2012.

[47]: Bernard Multon. *LES MACHINES SYNCHRONES AUTOPILOTÉES*. DEA. Préparation à l'agrégation de Génie Electrique, France. 2010, pp.62. cel-0124963353.