

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et Technologie

Département d'électrotechnique

N° /2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Electromécanique

SPECIALITE: Electromécanique

Thème

**Etude structurelle, modélisation et commande
d'une chaîne de traction pour véhicule électrique**

Présenté Par : Walid Boulebtina

Encadré Par : Abdelaziz Maouche

Haroun Bouchrout

Date de soutenance : 13/07/2022

Jury de Soutenance

Président :	Grade	Univ MSB jijel
Encadreur :	Grade	Univ MSB jijel
Examineur 1:.....	Grade	Univ MSB jijel
Examineur 2:	Grade	Univ MSB jijel

Promotion : 2021 /2022

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs meyada et loubna et mes chers frères khaled, hossam, lotfi, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille ' Boulebtina ', mes amis et toute la promotion 2021/2022 ' électromécanique ' pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Merci à tous...

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs “Radja, Fatiha, Hassiba, Chahera , Kawter, Fatima “ et mes chers frères“ Nacer, Bader“ pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille, mes amis et toute la promotion 2021/2022 ‘ électromécanique ’ pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l’accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d’être toujours là pour moi.

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions le grand Dieu qui nous a donné l'occasion de vivre cette journée et le remercions de nous avoir donné la force, le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

On tient à remercier notre encadreur Dr. «Abdelaziz Maouche» pour ses conseils pertinents et éclairés, son aide était pour nous d'une importance capital dans la réalisation et à la réussite de ce travail.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.

On exprime nos profonds remerciements à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail ainsi qu'à tous les enseignants du département électrotechnique.

Liste des figures

Chapitre I

Fig(I.1)	La voiture électrique « jamais contente » créée par Camille Jeanatzy	04
Fig(I.2)	Exemple de véhicule électrique d'aujourd'hui	04
Fig(I.3)	Système de propulsion d'un VE	05
Fig(I.4)	Véhicules électriques rechargeables par prise	06
Fig(I.5)	Véhicules électriques à pile combustible	07
Fig(I.6)	Véhicules électriques hybrides	08
Fig(I.7)	les pays plus vendues Les voitures électriques dans 2021	09
Fig(I.8)	Les voitures électriques les plus vendues dans 2021	10
Fig(I.9)	Solution monomoteurs	10
Fig(I.10)	Solution multi moteur	11
Fig(I.11)	Les différents modes de charge proposés	15
Fig(I.12)	les éléments constituant la chaine de traction	16
Fig(I.13)	Représentation schématique des modèles utilisés pour chaque composant	17

Chapitre II

Fig(II.1)	Représentation schématique des modèles utilisés pour chaque composant	20
Fig(II.2)	Les Forces appliquées sur le véhicule	21
Fig(II.3)	Schéma simplifié pour la détermination de la pente	22
Fig(II.4)	Conditions de roulage	24
Fig(II.5)	Forces applique au véhicule	25
Fig(II.6)	Représentation simplifié du modèle véhicule	26
Fig(II.7)	couple, vitesse et puissance de transmission.	27
Fig(II.8)	Schéma cinématique d'un système de transmission	28
Fig(II.9)	Le système de transmission	29
Fig(II.10)	Schéma bloc du modèle de transmission	30
Fig(II.11)	Couple, vitesse et puissance moteur	30
Fig(II.12)	Constitution de La machine asynchrone	31
Fig(II.13)	Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée	32
Fig(II.14)	Transformation de Park	34
Fig(II.15)	Grandeurs mécanique de MAS	39
Fig(II.16)	Grandeurs électromagnétiques de la machine	40
Fig(II.17)	Schéma de principe de l'onduleur.	41
Fig(II.18)	Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance	41
Fig(II.19)	Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance (équilibré).	42
Fig(II.20)	Principe de modulation de la technique triangulo-sinusoidale (STPWM).	45
Fig(II.21)	Les tensions simples à la sortie de l'onduleur	46
Fig(II.22)	Signaux de commande du premier bras de l'onduleur	47
Fig(II.23)	La vue interne d'une batterie	47
Fig(II.24)	charge et décharge d'une batterie au plomb	49
Fig(II.25)	charge et décharge d'une batterie (Ni-Cd)	49

Fig(II.26)	schéma de fonctionnement d'une batterie (Ni-MH)	50
Fig(II.27)	Principe de fonctionnement d'une cellule Li-ion (charge, décharge)	51
Fig(II.28)	tension (OCV) aux bornes d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC.	53
Fig(II.29)	résistance interne(DCR) d'une cellule (Li-ion) en fonction du SOC et T°.	53
Fig(II.30)	Simulation d'une Décharge d'une cellule Li-ion	54
Fig(II.31)	la tension d'une cellule au pack batterie	55
Fig(II.32)	Tension et courant en situation de décharge d'une batterie Lithium-ion	56
Fig(II.33)	schéma globale du système de puissance du véhicule électrique	57
Fig(II.34)	schéma de simplifié de la chaîne de traction	59

Chapitre III

Fig(III.1)	Chaîne de traction d'un véhicule électrique simplifié	61
Fig(III.2)	Puissances nécessaires au niveau des organes en fonction de vitesse	62
Fig(III.3)	Rendement des organes de la chaîne de traction à vitesse constante	62
Fig(III.4)	Chaîne de traction simplifiée	64
Fig(III.5)	Première Chaîne de traction simplifiée	65
Fig(III.6)	Evolution des grandeurs mécanique de la MAS	65
Fig(III.7)	Grandeur électromagnétique	66
Fig(III.8)	Chaîne de traction simplifiée (deuxième partie de simulation)	67
Fig(III.9)	Evolution des grandeurs de mécanique la machine	67
Fig(III.10)	Evolution grandeurs électromagnétiques de la MAS	68
Fig(III.11)	Simulation de la décharge d'une batterie Li-ion	69
Fig(III.12)	Architecture d'une chaîne de traction (Avec commande et conducteur)	70
Fig(III.13)	Conditions de roulage appliqués (Exemple du deuxième chapitre)	71
Fig(III.14)	Evolution des grandeurs mécanique de la MAS	72
Fig(III.15)	Evolution des grandeurs électromagnétiques de la machine	73
Fig(III.16)	Erreurs de poursuites commises sur vitesse de la machine et du véhicule	74
Fig(III.17)	Simulation de la décharge de la batterie Li-ion	74

Liste des Tableaux

Tab(I.1)	Les caractéristiques des moteurs électriques	12
Tab(II.1)	Tableau comparatif des technologies de batteries actuelles	50

Table des Matières

Liste des figures	
Liste de Tableaux	Page
Introduction Générale	01

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes de traction pour véhicules électriques

I.1. Introduction	03
I.2. Historique	03
I.3. Véhicule électrique	04
I.3.1. Classification des véhicules électriques	05
I.3.1.1. Véhicules tout électrique	05
I.3.1.1.1. Véhicules électriques à batteries par prise de courant	06
I.3.1.1.2 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible	06
I.3.1.2. Véhicules hybrides	07
I.3.2. Les normes de sécurité dans les véhicules électriques	08
I.3.3. Les véhicules électriques dans le monde	08
I.3.3.1. Les pays qui se mettent à la voiture électrique	09
I.3.3.2. Les voitures électriques les plus vendues dans le monde	09
I.4. Les différentes configurations des véhicules électriques	10
I.4.1. Véhicules électriques mono moteur	10
I.4.2. Véhicules électriques multi-moteur	11
I.5. Les moteurs électriques utilisés pour l'entraînement d'un Véhicule	11
I.6. Avantages et inconvénient des véhicules électriques	12
I.7. Les solutions proposées pour améliorer l'utilisation des véhicules électriques	14
I.8. Description générale de la chaine de traction	16
I.9. Conclusion	18

CHAPITRE II

Modélisation de la chaine de traction pour véhicule électrique

II.1. Introduction	19
II.2. Modélisation de la chaine de traction	19
II.2.1. Modèle du véhicule	20
II.2.1.1. Les équations des forces	21
II.2.1.2. Les équations du couple et de la vitesse	26
II.2.2. Modelé de transmission	27
II.2.2.1. Les pertes dans un système de transmission	28

II.2.2.2. Les équations de la vitesse et du couple	29
II.2.3. Modélisation de la machine électrique	31
II.2.3.1. Machine asynchrone	31
II.2.3.2. Hypothèse simplificatrices	31
II.2.3.3. Modélisation de la Machine dans le plan triphasé abc	32
II.2.3.4. Transformation de Park	34
II.2.3.5. Choix du repère	36
II.2.3.6. Simulation du fonctionnement de la machine	39
II.2.4. Etude de l'onduleur de tension	41
II.2.4.1. Structure de l'onduleur de tension triphasé	41
II.2.4.2. Principe de fonctionnement	42
II.2.4.3. Modèle mathématique de l'onduleur de tension	43
II.2.4.4. Modulation de largeur d'impulsion (MLI)	44
II.2.5. La batterie	47
II.2.5.1. Les différents types de batteries	48
II.2.5.1.1. La batterie Plomb Acide	48
II.2.5.1.2. Les batteries Nickel-Cadmium	49
II.2.5.1.3. Les batteries Nickel-hydrure Métallique	50
II.2.5.1.4. Les batteries Lithium-ion	50
II.2.5.2. Principe de fonctionnement des batteries Lithium-ion	51
II.2.5.3. Modélisation de la batterie	52
II.2.5.3.1. Etat de charge d'une cellule de la batterie (SOC)	52
II.5.3.2. La tension fournie par une cellule	52
II.5.3.3. De la cellule à la batterie (d'un pack)	55
II. 3. Modèle de la chaîne de traction du véhicule électrique	57
II.4. Conclusion	59

CHAPITRE III

Association et simulation de la chaîne de traction

III.1. Introduction	60
III.2. Association des éléments de la chaîne de traction	60
III.3. Autonomie de la chaîne de traction du véhicule électrique	63
III.4. Simulation du fonctionnement de la chaîne de traction	64
III.4.1. Simulation de la première partie de la chaîne de traction	64
III.4.2. Simulation de la deuxième partie de la chaîne de traction	67
III.4.3. Pilotage de la chaîne de traction	70
III.5. Conclusion	75
Conclusion Générale	76
Bibliographie	78

Introduction Générale

Le véhicule automobile est l'un des moyens de locomotion les plus répandus. De manière générale, celui-ci est composé d'une structure sur laquelle est installé un groupe moto propulseur. Ce dernier se compose d'un moteur qui produit l'énergie mécanique nécessaire. Le moteur le plus connu est celui à combustion interne ou plus communément appelé moteur thermique. Celui-ci utilise comme source d'énergie de l'essence, de l'alcool ou voir même un gaz. Malgré un rendement médiocre, l'intérêt de cette solution réside dans l'autonomie liée à l'énergie massique élevée du carburant et sa facilité pour le stockage. Ces moteurs sont mis en défaut pour leurs émissions de gaz à effet de serre et de particules néfastes pour la santé, ainsi que l'utilisation d'énergies fossiles vouées à se raréfier dans les décennies à venir. La pollution engendrée par les moteurs thermiques réduit la qualité de l'air, surtout dans les grandes villes où la concentration de véhicules peut être très importante, [1].

Une alternative pour diminuer la pollution produite localement par les moteurs thermiques est l'utilisation de véhicules propulsés par une énergie propre tels que les véhicules électriques. Bien sûr, il faudra prendre en compte le coût énergétique et la pollution liés à la production de l'électricité pour propulser le véhicule électrique, avec notamment le recyclage et traitement des déchets permettant la génération de l'électricité,[1],[2]. Cette étude montre que la chaîne de production (du puits à la roue) pour les véhicules électriques à un rendement moyen de 26% contre environ 18% en moyenne pour les véhicules thermiques. Dans cette chaîne de production est pris en compte, l'extraction, la transformation, le transport et l'utilisation de l'énergie, [3], [4]. Ce qui n'est pas pris en compte est « l'énergie grise », c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour la fabrication et le recyclage des matériaux nécessaires pour la réalisation des véhicules. Les véhicules électriques ont sans doute un besoin en (énergie grise) plus important que les véhicules thermiques dû à la fabrication des batteries. D'un point de vue général les véhicules électriques pourraient avoir un impact sur l'environnement aussi important que les véhicules thermiques. Au niveau historique, les premiers véhicules électriques ont fait leur apparition quasiment en même temps que les véhicules thermiques à la fin du XIXe siècle. Leur invention fut possible grâce à l'accumulateur au plomb réalisé par Gaston Planté en 1859, [4].

Introduction Générale

Notre travail repose sur l'étude structurelle, la modélisation et l'étude de la commande d'une chaîne de traction pour véhicule électrique.

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

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à présenter les modèles des différents éléments de la chaîne, tels que le modèle mécanique longitudinal du véhicule électrique(VE), le modèle de la batterie, du système de transmission, du convertisseur statique et à modéliser l'actionneur électrique utilisé. Aussi, un modèle d'association des différents éléments sera proposé pour qu'il soit étudié et détaillé dans le chapitre suivant.

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

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

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes de traction
pour véhicules électriques

I. Introduction :

Dans un temps où l'activité humaine et le potentiel économique ne cessent d'évoluer, le XX^{ème} siècle a connu un réchauffement climatique jamais enregistré dans les temps de nos ancêtres. Les causes ne sont pas tant à rechercher dans la nature que dans la concentration dans l'atmosphère de CO₂ et des autres gaz dus à l'activité humaine [1]. Le secteur des transports est désormais le secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre, c'est la pour cela que l'industrie de l'automobile s'intéresse précieusement au phénomène de la pollution afin d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre et de contribuer dans son domaine à une vie plus saine, et propose le véhicule électrique pour améliorer la qualité de l'air grâce à des émissions nulles en échappement.

Les véhicules électriques (VE) et hybrides constituent actuellement une alternative possible aux véhicules conventionnels, permettant aux constructeurs de véhicules de pouvoir répondre aux exigences demandées par les utilisateurs des véhicules (performances et consommation du carburant) et les lois de protection de l'atmosphère (réduction des émissions de polluants), [5].

I.2. Historique :

La voiture électrique a même été le premier véhicule automobile à avoir franchi le cap des 100km/h. Ce record a été établi par le Belge Camille Jenatton en 1899 au volant de la voiture au célèbre nom de « la jamais contente ».

La fabrication en série des véhicules électriques a débuté à partir de 1905 avec l'entreprise Edison électrique car. Cependant la production fut abandonnée à cause du succès de la Ford T qui fut fabriquée en série de 1908 à 1927 avec la réalisation et la vente de plus de 16 millions d'exemplaires. De 1959 à 1960, de nouvelles tentatives de production de véhicules électriques ont été réalisées par l'entreprise Henry Kilowatt aux Etats Unis. Celle-ci n'a pas connu le succès attendu car sa production n'a duré pas plus d'un an et seulement 100 exemplaires ont été conçus. Puis, plusieurs modèles de véhicules électriques ont vu le jour et ont été réalisés, mais n'ont pas connu une production de masse et un franc succès de la part des consommateurs : l'inconvénient majeur étant la difficulté de stockage de l'énergie et en conséquence le peu d'autonomie disponible pour ces véhicules. Mais après différentes périodes de hauts et de bas, le véhicule électrique est de nouveau au

devant de la scène. Sa présence est amplifiée par le prix du pétrole qui est à la hausse depuis quelques années [1].



Figure(I.1) : Premier véhicule automobile à avoir franchi la barre des 100 km/h., la voiture électrique « jamais contente » créée par Camille Jeanatzy en 1899.

Aujourd'hui, Les voitures électriques sont axées sur un usage urbain. Elles sont souvent de petite taille. Elles restent cependant assez chères, par exemple, Mitsubishi commercialise une voiture électrique depuis 2009 au Japon, aux performances respectables d'une vitesse de 140KM/h et une autonomie flirtant avec les 160 km d'après leurs annonces, [2].



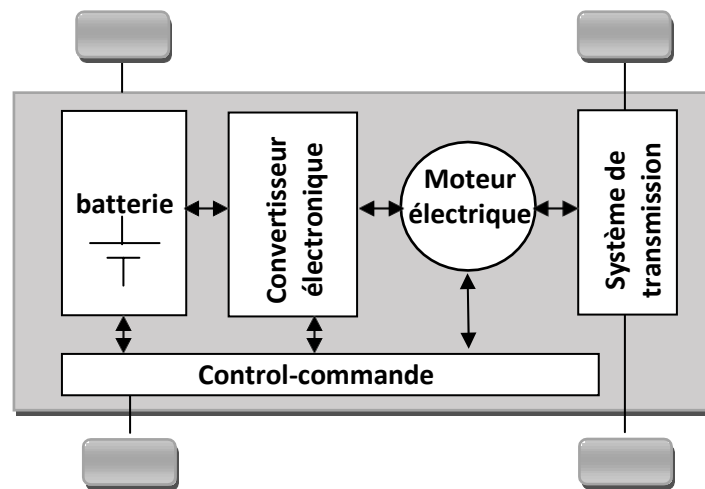
Figure(I.2) : Exemple de véhicule électrique d'aujourd'hui.

I.3. Véhicule électrique :

La voiture électrique présente la particularité d'être munie d'un ou plusieurs moteurs électriques qui transmettent la force motrice aux roues selon la solution de transmission retenue.

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

Le système de propulsion électrique est l'organe principale du VE, il est propulsé électriquement par des moteurs et comporte un système de transmission formé par un ou plusieurs moteurs électriques entrainant deux roues motrices, Il a une architecture très simple. Il est constitué d'un actionneur électrique, un dispositif de transmission, et des roues.



Figure(I.3) : Système de propulsion d'un VE

I.3.1. Classification des véhicules électriques :

Compte tenu de la progression scientifique et des technologiques révolus dans le domaine de l'électronique, l'électronique de puissance, la conception des machines ... etc, beaucoup d'idées et de nouvelles reproductions des VEs sont utilisées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le transport, et surtout le stockage et l'utilisation de l'électricité.

En plus des VEs, les véhicules hybrides VHs font partie de la famille des véhicules électrifiés qui désigne l'ensemble des véhicules hybrides, hybrides rechargeables et électriques. Dans ce qui suit on va essayer de donner les sous-catégories qui peuvent exister.

I.3.1.1. Véhicules tout électrique :

Il s'agit d'un véhicule qui possède uniquement une seule source d'énergie, ainsi, le véhicule tout électrique semble bien adapté pour les petits véhicules urbains. En effet, ceux-ci ne sont

pas trop pénalisés par la limitation de la puissance et de l'autonomie et le problème des pollutions gazeuse et sonore est essentiel pour eux, [6].

Le développement de VE est fortement lié au développement de son alimentation en énergie : les batteries. Les batteries dont l'énergie massique est relativement faible sont de plus très lourdes et très coûteuses. Selon la source d'énergie utilisée pour alimenter ces véhicules, on distingue essentiellement deux types de véhicules électriques : voitures électriques à batteries rechargeables par prise de courant et voitures électriques à alimentation par pile à combustible.

I.3.1.1.1. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant :

Les véhicules électriques fonctionnant avec des batteries, constituent aujourd'hui l'essentiel du parc mondial des véhicules électriques. Une batterie est un système embarqué pouvant stocker de l'énergie électrique pour la restituer par la suite. C'est à ce jour le système le mieux adapté pour l'alimentation des véhicules électriques. Son invention remonte au 19^{ème} siècle, il est, de ce fait, le système de stockage le mieux maîtrisé techniquement [7].



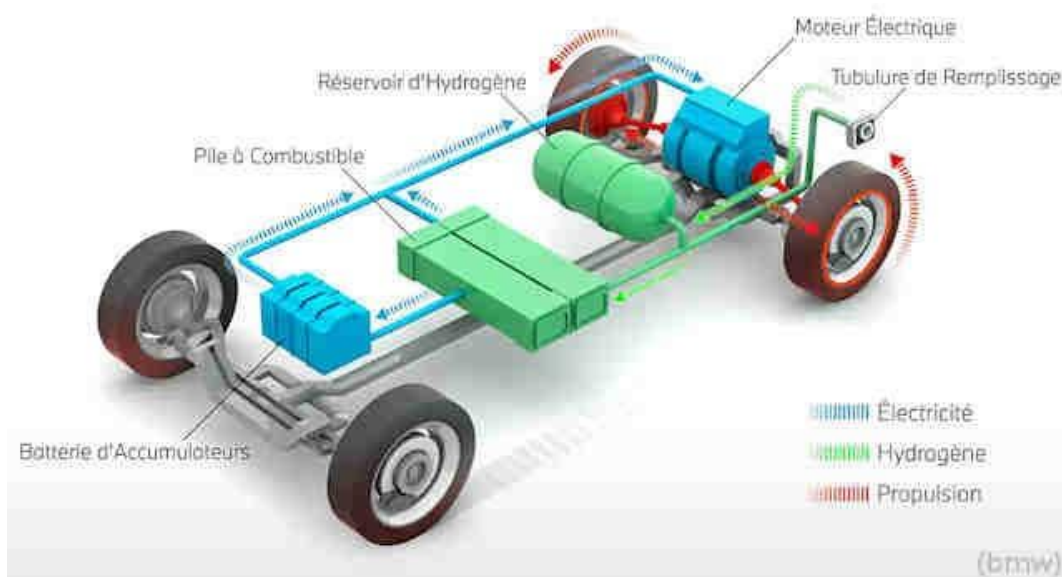
Figure(I.4) : Véhicules électriques rechargeables par prise.

I.3.1.1.2 Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible :

Les VE à pile à combustible sont semblables aux autres véhicules électriques sauf qu'ils produisent leur propre électricité à bord. La source de cette électricité est la pile à combustible, un dispositif électrochimique semblable à une batterie à plusieurs égards. Plutôt que de stocker et relâcher l'énergie électrique comme une batterie, une pile à combustible

produit toutefois de l'électricité par réaction chimique aussi longtemps qu'elle reste alimentée en carburant. Il y a divers types de piles à combustible qui fonctionnent avec différents carburants mais la pile à membrane échangeuse de protons, considérée comme la plus prometteuse pour les véhicules automobiles, utilise de l'hydrogène H_2 et l'oxygène de l'air ambiant comme carburants [7].

L'application de cette technologie dans le domaine automobile est assez récente et relève encore de l'expérimentation. La pile à combustible existe depuis près deux cents ans. Elle fut inventée en Angleterre au début du 19^{ème} siècle par deux anglais, Sir Henry Davy et Sir William Grove.

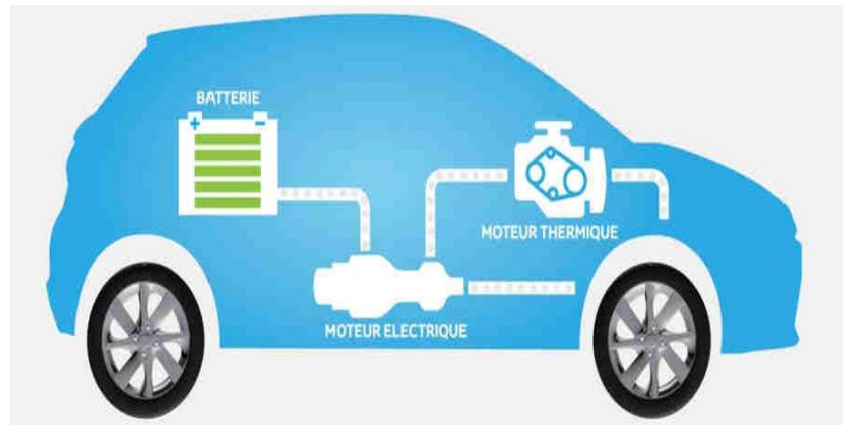


Figure(I.5) : Véhicules électriques à pile à combustible.

I.3.1.2. Véhicules hybrides :

Les véhicules hybrides utilisent au moins deux types de production et de stockage d'énergie habituellement un moteur thermique classique (essence ou diesel), en plus d'au moins un moteur électrique et le stockage d'électricité par batteries. Ces systèmes peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment les uns des autres. Les VH, sont quant à eux munis d'un moteur classique et d'un moteur électrique qui fonctionnent en combinaison selon la vitesse et l'accélération du véhicule. Le moteur électrique permet d'améliorer les performances du moteur thermique ainsi que l'autonomie du véhicule [8].

On distingue deux principaux types de système d'entraînement hybrides : parallèle et série, ces systèmes diffèrent dans leurs façons d'intégrer le fonctionnement des deux unités de production d'énergie.



Figure(I.6) : Véhicule électrique hybride.

I.3.2. Les normes de sécurité dans les véhicules électriques :

Comme c'est le cas pour tous les véhicules à moteur à combustion interne, les constructeurs de véhicules électriques doivent respecter toutes les normes fédérales en matière de sécurité. De plus, puisque les constructeurs accordent une grande importance au succès et à la durabilité de l'industrie des véhicules électriques, ils ont tout intérêt à ce que la sécurité de ces véhicules constitue une priorité. Selon des essais réalisés par la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), le Tesla Model S a reçu la cote la plus sécuritaire jamais accordé à un véhicule en 2014, [9].

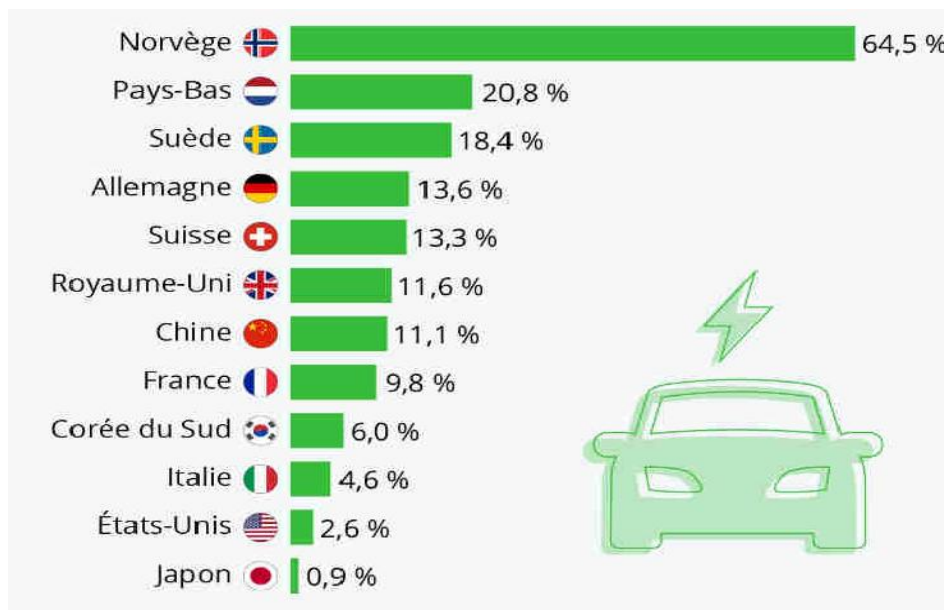
I.3.3. Les véhicules électriques dans le monde :

Sur le marché mondial de la voiture tout électrique, une grande concurrence est désormais connue entre différentes firmes, Tesla, Toyota, Volkswagen, BMW, Ford, Renault ... etc, sont des marques de constructeur des VE qui ont beaucoup investi dans ce domaine, Le constructeur Tesla domine la hiérarchie mondiale avec 21 % de part de marché. En 2021, Tesla s'est imposé comme le champion mondial de la voiture électrique avec 936 172 unités vendues à travers le globe. De plus, beaucoup de pays ont avancés de plus dans l'utilisation des véhicules électriques, pour certains raisons, à savoir, la réduction du coût des énergies hydrocarbure (qui sont, principalement, des importateurs) et aussi parce qu'ils s'intéressent

précieusement au phénomène de la pollution afin d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre et de contribuer dans son domaine à une vie plus saine et propose.

I.3.3.1. Les pays qui se mettent à la voiture électrique :

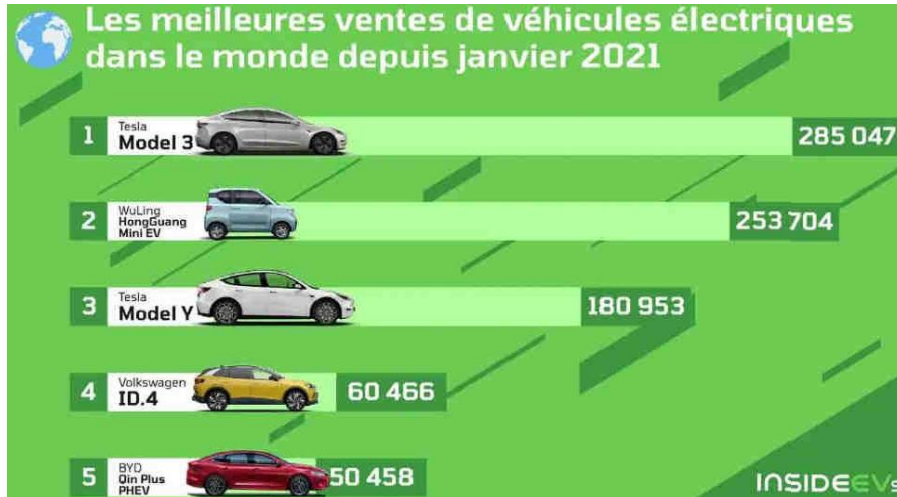
En regardant les parts de marché des modèles tout électrique, l'Europe est toujours en pole position. Comme les années précédentes, la Norvège constitue l'exception la plus notable en tête de liste : en 2021, près de deux voitures nouvellement immatriculées sur trois étaient électriques. Les Pays-Bas et la Suède affichent également parmi les parts de marché les plus élevées, respectivement 20,8 % et 18,4 %, témoignant de l'adoption rapide de la mobilité électrique en Europe du Nord.



Figure(I.7) : les pays plus vendues des voitures électriques dans 2021

I.3.3.2. Les voitures électriques les plus vendues dans le monde :

Au cours des dernières années, le marché de véhicule thermique a connu une diminution significative du nombre de ventes, car les acheteurs se sont tournés vers les véhicules électriques et ont augmenté le nombre de ventes de véhicules électriques, et dans le classement cumulatif 2021 (janvier-août), la (Tesla Model 3) est arrivé en tête, reste la voiture électrique la plus vendue, à travers le monde, suivie de la (Wuling HongGuang Mini EV) en deuxième position. D'autres constructeurs européens ont bien avancés aussi dans la construction des véhicules électriques, on peut cité la réussite, en vente, des marques Volkswagen (surtout les deux modèle ID.3 et ID.4), BMW, et Renault (le modèle Renault Zoé), la figure suivante montre le classement des véhicule les plus vendues en 2021 dans le monde :



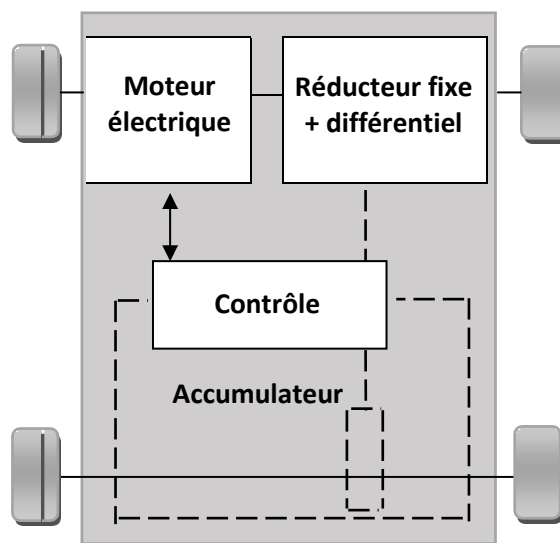
Figure(I.8) : Les voitures électriques les plus vendues dans 2021

I.4. Les différentes configurations des véhicules électriques :

Nous allons essayer de représenter une liste non exhaustive de quelques ébauches de solutions aux problèmes de la motorisation d’un véhicule électrique. Cette dernière, est proposée sous une forme soit monomoteur, soit multi-moteurs (deux ou quatre).

I.4.1. Véhicules électriques mono moteur :

L’architecture mono moteur (Figure I.3 et Figure I.9) qui emploie un seul moteur électrique, une batterie, un variateur de vitesse du moteur électrique (un onduleur ou un hacheur réversibles) et un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple) [10].

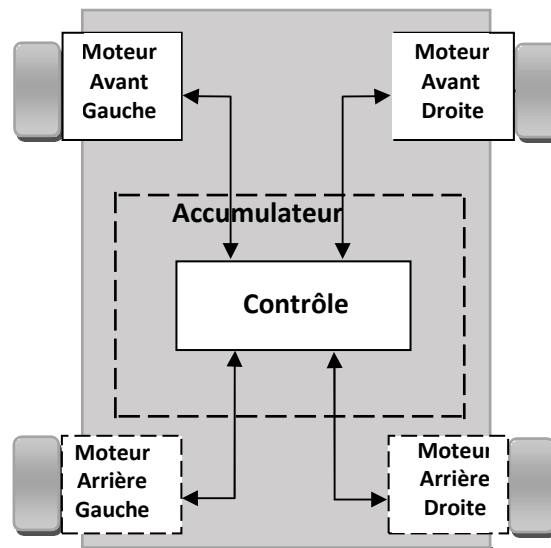


Figure(I.9) : Solution monomoteur

L'architecture de véhicule électrique mono moteur est la plus utilisée dans les systèmes de traction des véhicules standards de circulation. Par contre, elle existe une autre architecture qui utilise plusieurs moteurs, cette architecture est beaucoup plus utilisée dans les véhicules spéciaux et en robotique.

I.4.2. Véhicules électriques multi-moteur :

Sur les VEs multi moteur on trouve deux grandes architectures, l'une utilise une double chaîne de traction à l'aide de deux moteurs à courant continu qui permet d'avoir plus de fiabilité coté moteur, l'autre utilise un moteur asynchrone et deux moteurs roue pour permettre d'augmenter le différentiel mécanique du véhicule. La figure suivante (Figure I.10) donne un exemple de véhicule électrique VEs multi-moteurs, et dans cette configuration, les quatre roues sont des roues motrice [11].



Figure(I.10) : Solution multi moteur

I.5. Les moteurs électriques utilisés pour l'entraînement d'un Véhicule :

Les moteurs électriques sont des éléments très importants dans la chaîne de traction des véhicules électrique, et d'après notre recherche et nos connaissances, on a distingué qu'elles existent plusieurs possibilités du choix du type des machines à utiliser; on peut trouver des machines à courant continu, des machines synchrones à rotor bobiné, des machine synchrone à aimants permanents, ou bien des machines asynchrones que ce soit avec rotor bobiné ou a cage...etc). Chaque type des moteurs a des avantages, mais il a aussi des inconvénients, et chaque fabricants de choisir son type spécifique en fonction du cahier de charge, avantage, ou

bien des technologies de fabrication qu'il possède. Dans le tableau suivant, on a donné les avantages et les inconvénients qui présentent chaque type de moteur en tenant compte de ces technologies embarqués [7].

Type de machine	Avantages	Inconvénients
Machine asynchrone (MAS)	<ul style="list-style-type: none"> -Fabrication maîtrisée. -Puissance massique élevée. - Moteur robuste. -Montée en survitesse aisée. - Longue durée de vie. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rendement faible. -Pertes Joule rotorique. -Faible couple de démarrage. -Electronique coûteuse. -Commande complexe.
Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)	<ul style="list-style-type: none"> -Flux variable : facilité de contrôle. -Absence d'aimants. -Large plage de vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> -Plus volumineux et plus lourd que les MSAP. -Nécessite de l'électronique supplémentaire (hacheur). -fragilité des systèmes bagues balais.
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	<ul style="list-style-type: none"> -Technologie devenue Courante. -Puissance massique élevée. -Pas d'échauffement aut rotor. -Très bon rendement. -Refroidissement aisé. 	<ul style="list-style-type: none"> -Ondulations de couple. -Coût élevé des aimants. -Technologie coûteuse. - Survitesse pénalisante. -Difficulté de défluxage.
Machine synchrone à double excitation (MSDE)	<ul style="list-style-type: none"> -Bon rendement. -Puissance massique relativement élevée. -Large plage de vitesse. -défluxage facile. 	<ul style="list-style-type: none"> -Fragilité des bagues balais. -Nécessite de l'électronique supplémentaire (hacheur).

Tableau (I.1) : Caractéristiques des moteurs électriques.

I.6. Avantages et inconvénient des véhicules électriques :

Malgré les avantages, dont on a déjà parlé, des véhicules électriques et la concurrence qui ne cesse d'augmenter entre les fabricants de ce type de véhicule, il est important de dire qu'il faut aussi revoir les avantages et cité les inconvénients que présente ce type de véhicule pour connaitre les nombreux challenges à rencontrés.

I.6.1. Avantages :

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

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

I.6.2. Inconvénients :

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

- ✓ Question d'autonomie.
- ✓ La voiture doit être légère le plus possible : plus la masse du véhicule augmente, plus il demande d'énergie, et donc moins il circule longtemps.

- ✓ Comme tous les produits innovants ont un coût souvent élevé, le prix de ces voitures reste jusqu'à ce jour élevé.
- ✓ Ainsi la durée de recharge des batteries électriques est encore importante. De plus, lors de l'utilisation, le moteur électrique ne produit pas assez de chaleur. L'habitacle de la voiture ne sera pas assez chauffé. Pour un meilleur confort (climatisation, radio, etc.), la décharge des batteries est accélérée.
- ✓ La durée de vie de la batterie et la puissance du moteur électrique ne sont pas encore très importantes [12].

I.7. Les solutions proposées pour améliorer l'utilisation des véhicules électriques :

Actuellement, pour répondre au problème majeur de l'utilisation des véhicules électriques qui est l'augmentation de l'autonomie et la diminution du temps de recharge des batteries, la mise en place d'un réseau de stations de rechargement ou échange de batteries est indispensable pour les pays qui veu(x)ent bien avancés dans l'utilisation des véhicules électriques, au Danemark, aux États-Unis et en Australie (à titre d'exemples) furent proposées, mais le travail et le coût de la mise en place de ce type d'infrastructures est démentiel. De plus il serait indispensable de prévoir un format de batterie standard pour tous les véhicules, ce qui rend la tâche encore plus complexe.

Les chercheurs ont inventé des systèmes de stockage intermédiaire. De quoi découpler les stations de recharge du réseau tout en garantissant une rapidité d'exécution inégalée. Concrètement, ce stockage d'électricité est constitué d'une batterie lithium-fer de la taille d'un conteneur maritime. Cette batterie s'alimente en continu et à petite puissance sur le réseau. Lorsqu'arrive une voiture électrique, c'est cette batterie tampon qui fournit, sur le champ et sans avoir à solliciter le réseau, la puissance indispensable à une charge ultrarapide. Celle-ci se charge sur le réseau basse tension et est capable de fournir, dans le quart d'heure, les 20 à 30 kWh nécessaires à la charge d'une batterie de voiture électrique standard. Selon les chercheurs [12], il reste encore une belle marge de progression.

Avec l'essor du véhicule électrique, toutes nos habitudes risquent de se trouver bouleversées. Par le passé, les pompistes évaluaient la taille de leurs citernes en fonction de diverses données. Dans le futur, ils devront peut-être estimer la taille de leur stockage tampon en fonction des statistiques du trafic, de l'estimation du nombre de véhicules électriques, de la capacité de charge des batteries, etc. Les simulations réalisées par les chercheurs, [12], montrent ainsi qu'une station qui assurerait la recharge rapide de 200

véhicules par jour aurait besoin d'une capacité de stockage intermédiaire de 2,2 MWh. C'est le même ordre de grandeur que l'énergie consommée par un foyer en un an ! Cependant, en volume, cela correspond « seulement » à quelque quatre conteneurs maritimes [13], [14].

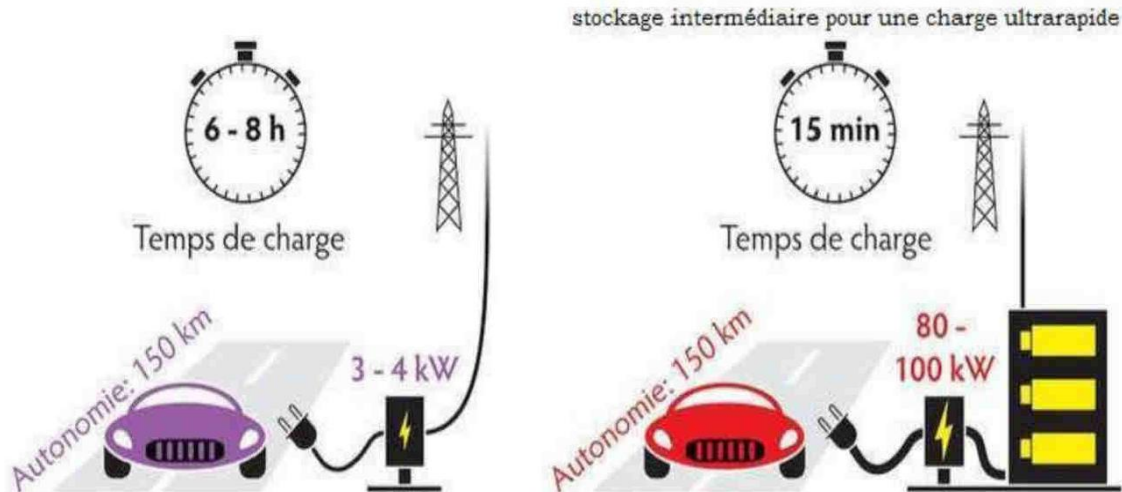


Figure (I.11) : Différents modes de charge proposés.

La borne de recharge rapide permet de récupérer près de 80 % des capacités batteries en moins de 15-30 minutes. Néanmoins, ces bornes ne sont pas encore normalisées à l'échelle européenne et requièrent de forte puissance avec un impact important sur le réseau électrique qui doit être pris en compte.

L'une des autres solutions proposées pour limiter la variation du courant de décharge et de charge dans les batteries consiste à utiliser des sources auxiliaires de puissance comme les super-condensateurs. Par la suite, l'étude d'un système d'assistance en puissance avec un système de stockage d'énergie embarqué est présentée. Son but principal est d'alléger les contraintes en puissance qui sont appliquées sur les batteries et donc de supprimer les inconvénients énumérés ci-dessus. De plus, la solution retenue permet de récupérer l'énergie de freinage et de limiter les variations du courant de charge/décharge dans les packs de batteries de manière optimale, [14].

En ce qui concerne les prix des véhicules électriques très élevés, la plupart des grands constructeurs travaillent, en partenariat avec les fournisseurs de batteries, à la construction d'usines qui permettront, grâce à la production de masse, de diminuer l'écart de coût entre un

véhicule électrique et un véhicule conventionnel. D'autres s'intéressent davantage à certains modèles économiques, comme la location de batteries, qui permettent de "gommer" ce coût initial plutôt rébarbatif.

Des fonds sonores peuvent être également installés pour signaler l'arrivée de la voiture électrique afin de résoudre le problème du moteur silencieux. Certains constructeurs, comme Renault avec la Zoé, ont déjà pris les devants et ont équipés leurs véhicules électriques d'un bruit simulé à faible vitesse.

I.8. Description générale de la chaîne de traction :

La chaîne de traction d'un VE est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Le choix et l'arrangement des composants qui constituent la chaîne de traction décrits dans la figure (I.12)

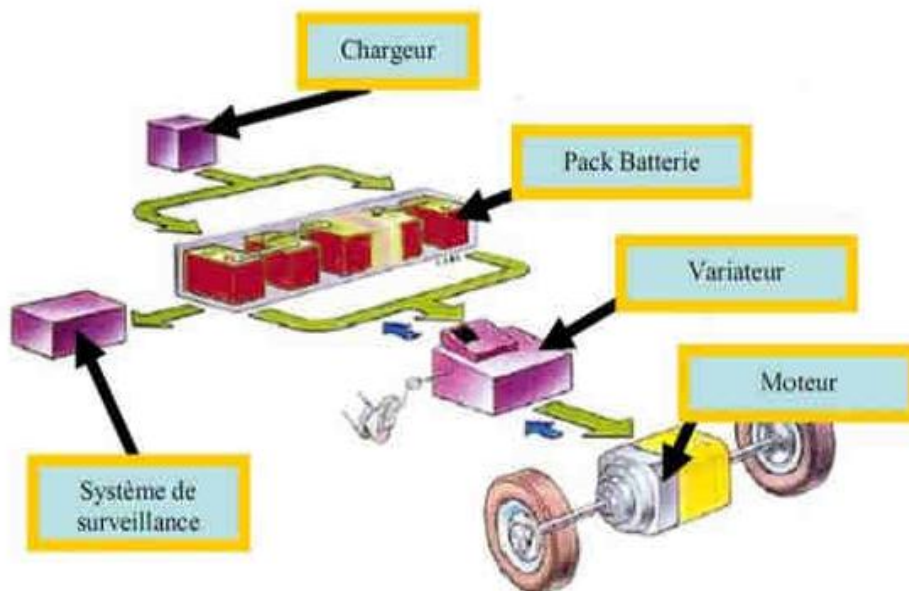
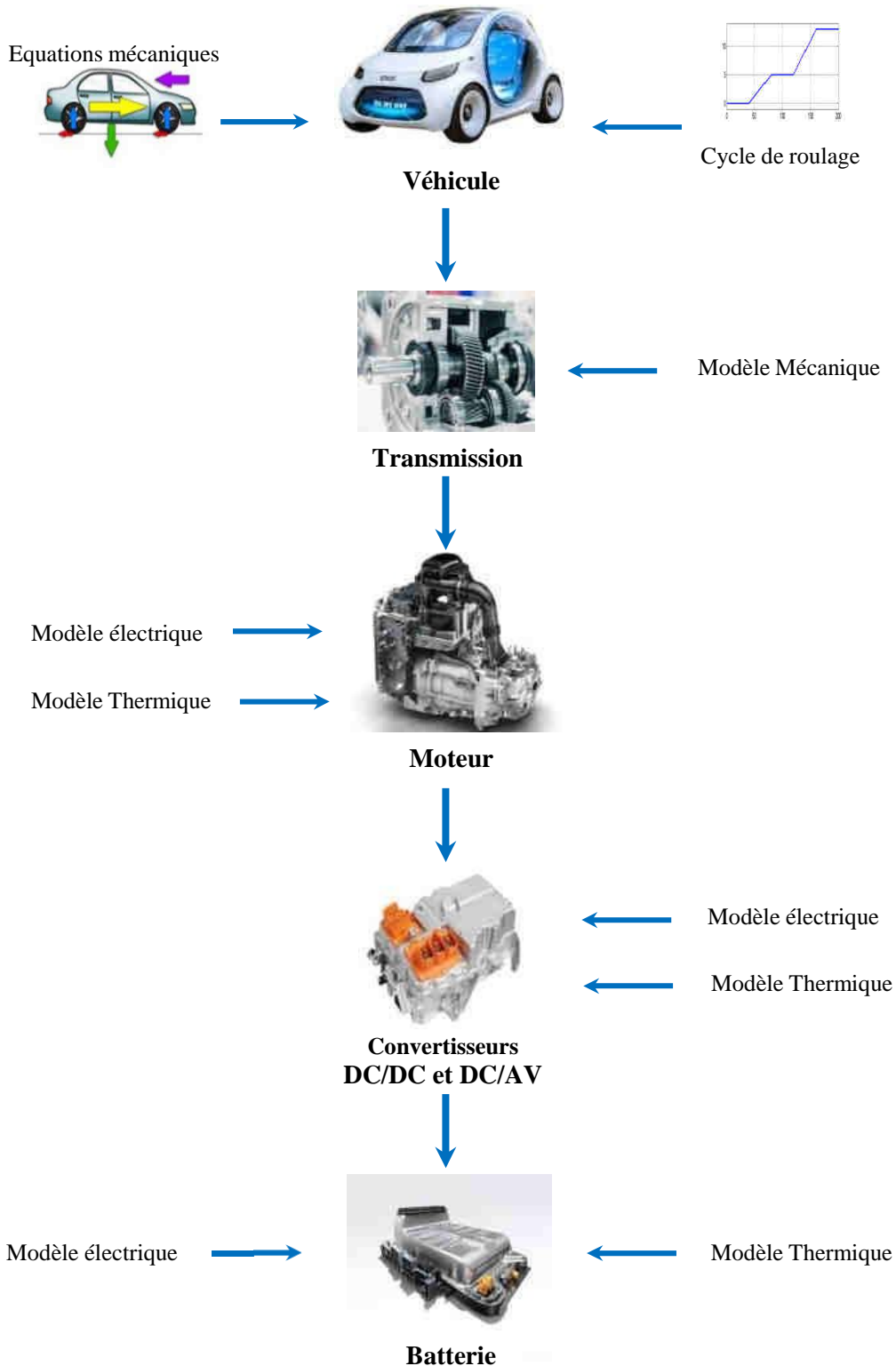


Figure : (I.12) : Eléments principaux constituant une chaîne de traction

Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, en fin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur.

Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique, ainsi que la gestion des flux d'énergie entre eux restent au stade de la recherche.

Dans cette partie on va diviser l'étude, en vue de la modélisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique, en Cinq parties principaux. La figure suivante présente les éléments de la chaîne de traction et le type de modèle à adopter.



Figure(I.13) : Représentation schématique des modèles utilisés pour chaque composant

En fin, une étude détaillée sera faite dans les parties à venir, elle concerne la présentation de la chaîne de traction et la modélisation des éléments un par un.

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art des systèmes de traction pour véhicules électriques, nous avons présenté son historique, ainsi que les différentes architectures en tenant compte des sources d'énergies utilisées et des types des moteurs utilisés dans les véhicules électriques, et nous avons également parlé de l'évolution de l'utilisation des voitures électriques dans le monde et des différents challenges rencontrés. Nous avons constaté que les systèmes de traction pour véhicule électrique sont des systèmes multidisciplinaires où beaucoup de technologies électriques, mécanique, thermique, énergétique, chimiques et aérodynamique sont interconnectés et forment ensemble un modèle d'un système dit chaîne de traction. Nous avons également donné des statistiques de l'utilisation des voitures électriques dans le monde et nous avons parlé de la concurrence qu'elle existe dans ces dernières années en termes de nombre de ventes.

Dans le chapitre suivant nous allons détailler de plus la structure de la chaîne de traction et il sera l'occasion pour faire une étude de modélisation détaillée de la chaîne de traction des véhicules électriques élément par élément.

CHAPITRE II

Modélisation de la chaîne de traction
pour véhicule électrique

II.1. Introduction :

La résolution du problème de pollution est l'un des défis majeur du 21^{ème} siècle. Ces dernières années ont vu un développement important de véhicules tous électriques qui semblent être la meilleure solution pour réduire les polluants dus aux transports routiers. Comme nous avons dit à la fin du chapitre précédent, la chaîne de traction pour véhicule électrique est un système embarqué est de plus en plus complexe car, elle est constituée de plusieurs éléments de conversion d'énergie ainsi que les couplages forts entre les différents sous systèmes.

L'étude et la modélisation de ce système est très complexe vue les nombreux paramètres et variables à prendre en compte. Dans ce chapitre, on s'intéressera à un système (chaîne de traction) issu d'une configuration tout électrique où la traction est assurée exclusivement par un moteur asynchrone à rotor bobiné. Dans ce chapitre, on définira les éléments d'une chaîne de traction avec une modélisation puis une simulation distincte pour chaque élément.

II.2. Modélisation de la chaîne de traction :

Il n'y a pas une unique possibilité pour connecter les modèles des composants entre eux. Le choix dépend de ce que le concepteur cherche à simuler. Sur un véhicule, le conducteur donne une consigne de vitesse en appuyant sur la pédale d'accélérateur. Celle-ci est transmise à l'organe de commande qui génère à son tour la référence à l'onduleur qui donne la tension et fréquence à imposer à la machine électrique afin qu'elle produise la vitesse voulue. La vitesse du véhicule est alors une conséquence. Pour modéliser le système de traction [13], il est nécessaire de respecter l'ordre des éléments et des entrées et sorties des modèles des différents composants. La modélisation des éléments de la chaîne, à savoir, véhicule, transmission, machine, onduleur et batterie ont été mis en place à partir des choix technologiques. La (Figure II.1) résume les types de modèles développés dans le cadre de ce travail sachant que nous avons ignoré le modèle thermique au niveau des quelques éléments comme la machine et la batterie. On a :

- Modèle véhicule : bilan des forces pour connaître la vitesse et le couple nécessaires aux roues pour suivre un cycle de roulage à partir de caractéristiques du véhicule.
- Modèle de transmission : modèle simplifié basé sur des essais qui permet d'estimer les pertes du réducteur en fonction de : couple, vitesse et température d'huile, et le rapport de transmission de le rédacteur
- Modèle de machines : modèle analytique basé sur un schéma équivalent obtenu à partir des dimensions de la machine.

- Modèle d'onduleur : modèle analytique qui permet d'estimer les pertes à partir des données de la fiche technique.
- Modèle de batterie : modèle électrique qui exploite des cartographies de tension et résistances en fonction de l'état de charge et de la température [13].

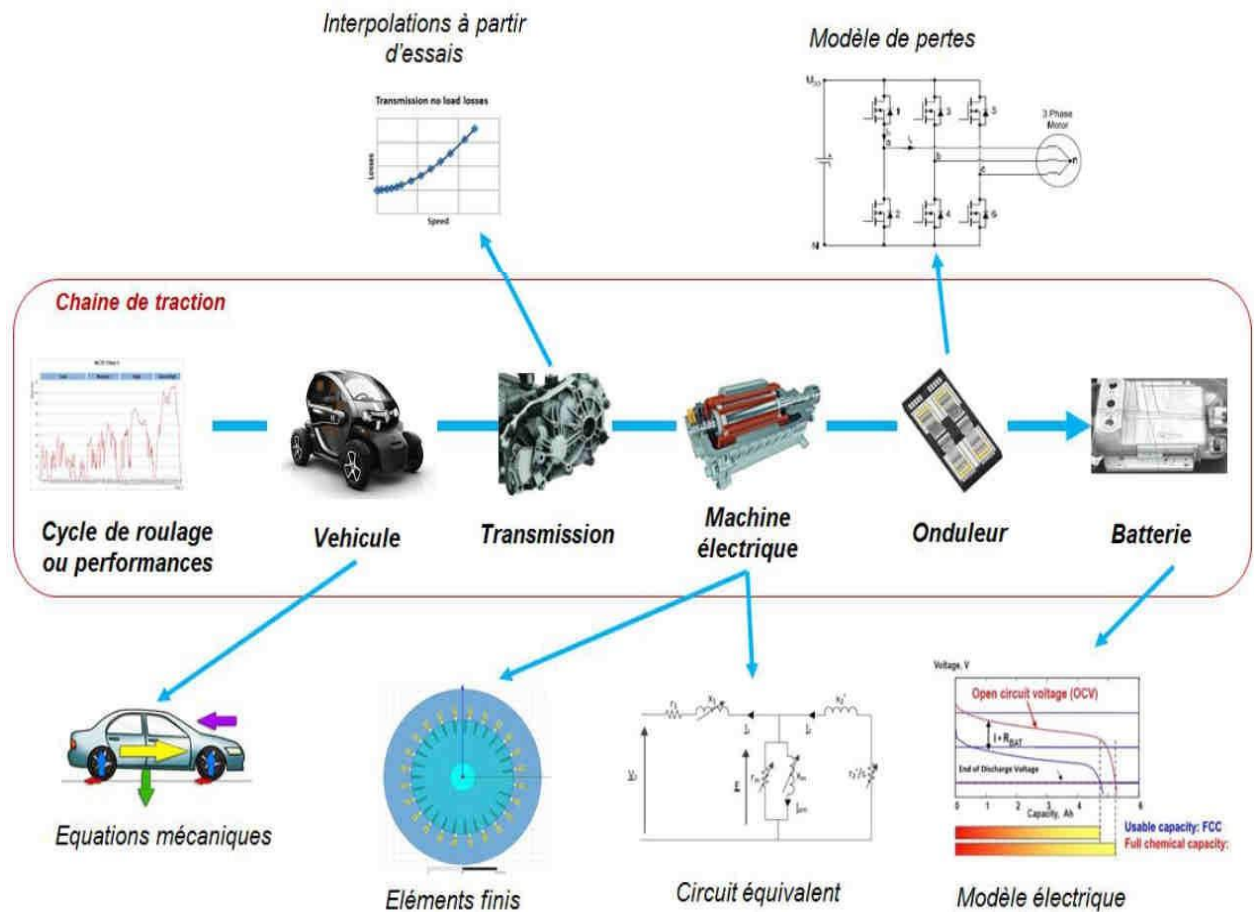


Figure (II.1): Représentation schématique des modèles utilisés pour chaque composant

II.2.1. Modèle du véhicule :

Le modèle du véhicule permet d'estimer les couples et les vitesses demandés à la roue pour pouvoir suivre un profil de vitesse en fonction du temps [13]. Avant de passer à la modélisation et le calcul des forces, la figure suivante montre les différentes forces appliquées sur un véhicule sur une trajectoire caractérisée par une pente.

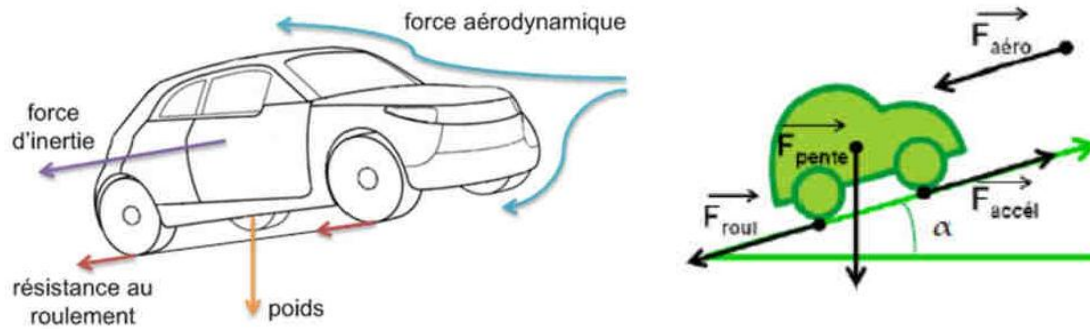


Figure (II.2): Forces appliquées sur le véhicule

Pendant le roulage, les forces appliquées sur le véhicule sont :

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

Dans ce qui suit on va donner les détails.

II.2.1.1. Les équations des forces :

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

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

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

Avec:

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

S_f : Section frontale du véhicule [m²].

C_x : Coefficient de pénétration dans l'air.

V_{veh_moy} : Vitesse du véhicule.

ρ : Masse volumique de l'air [kg/m³] recalculée en fonction de la température extérieure T_{ext} . Elle peut être calculée par cette équation :

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

Avec :

p : Pression atmosphérique absolue.

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

➤ Force pour vaincre une pente F_{pente} :

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

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

Avec :

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

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

α : Angle de la pente.

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

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

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

Avec :

M_{veh_vide} : Masse du véhicule à vide hors chaîne de traction $[kg]$

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

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

M_{mot} : Masse du moteur $[Kg]$

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

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

Exemple pour la définition de la pente : Dans la littérature, une pente à x% correspond à une montée de x mètres tous les 100 mètres (réellement) parcourus par le véhicule (Figure II.3) [15].

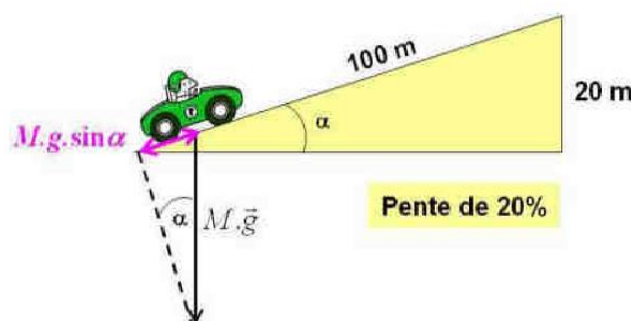


Figure (II.3): Schéma simplifié pour la détermination de la pente

$$F_{pente} = M \cdot g \cdot \sin \alpha = M \cdot g \cdot p_{\%} \quad \text{d'où} \quad \sin \alpha = p_{\%} = \frac{20}{100} = 0.2$$

Remarque : Une pente de 100% correspond à un angle d'inclinaison de 90° (pente infinie).

➤ Force de résistance au roulement :

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

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

Avec :

CRR : Coefficient de résistance au roulement, qui peut être calculé en incluant l'influence de la pression et de la température des pneus, ainsi que de la vitesse, par des formules empiriques.

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

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

➤ Force liée à l'accélération :

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

$$F_{accél} = \left(M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \gamma = \left(M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \dot{v}_{veh} \tag{II.6}$$

Avec :

R_{roue} : rayon de la roue.

γ : l'accélération.

J_{tot} : l'inertie totale.

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

$$J_{tot} = \eta_{roue} \cdot J_{roue} + J_{BD} + J_{AS} \cdot K_{AS/BD2} + (J_{AB} + J_{mot}) \cdot K_{AP/BD2} \tag{II.7}$$

Avec :

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

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

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

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

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

Exemple :

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

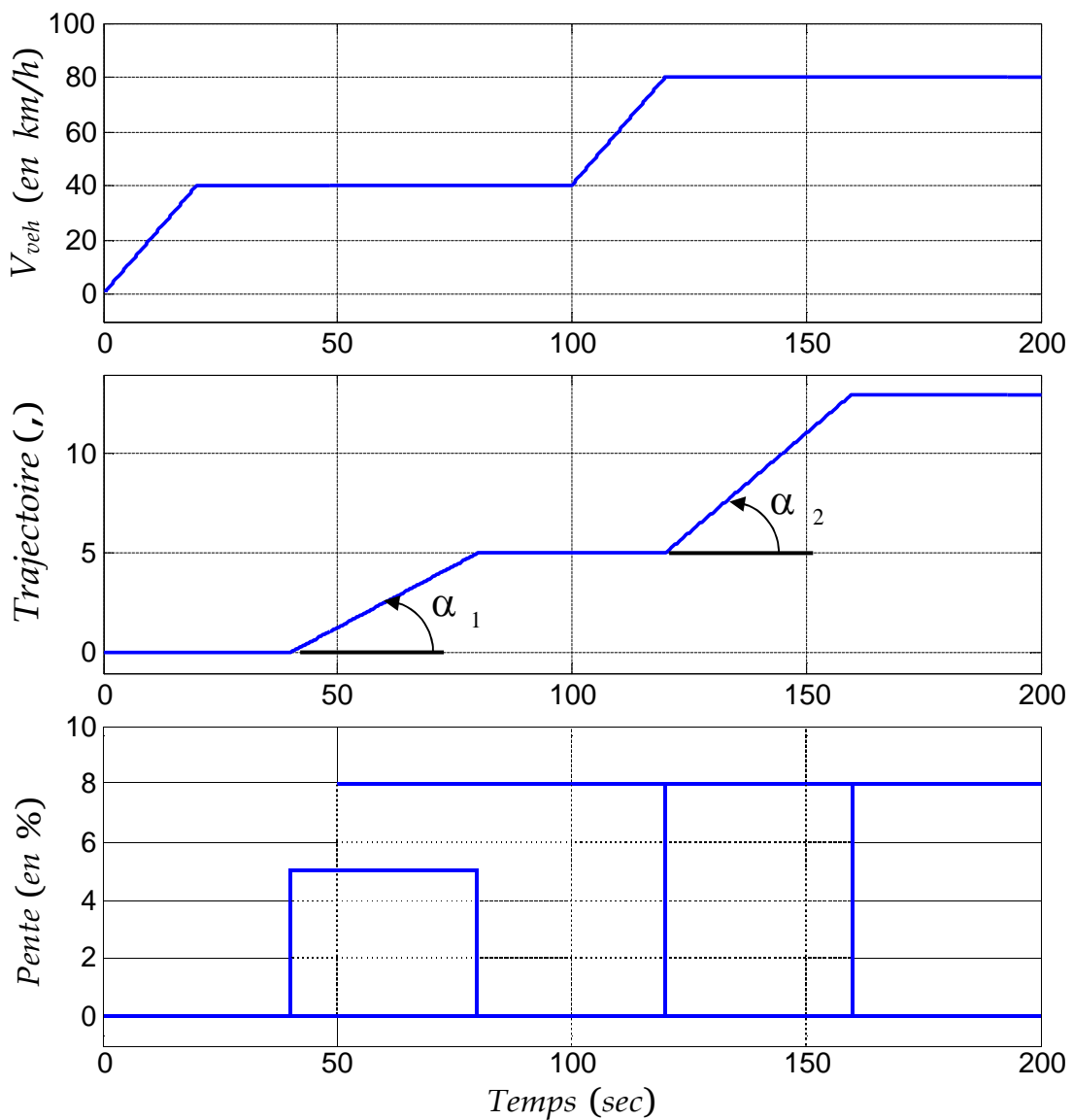


Figure (II.4) : Conditions de roulage (Exemple)

Alors si en tenant compte des paramètres du véhicule utilisé (donnés par l'annexe 1) et à partir des équations données précédemment, en peuvent déduire les valeurs des forces suivantes :

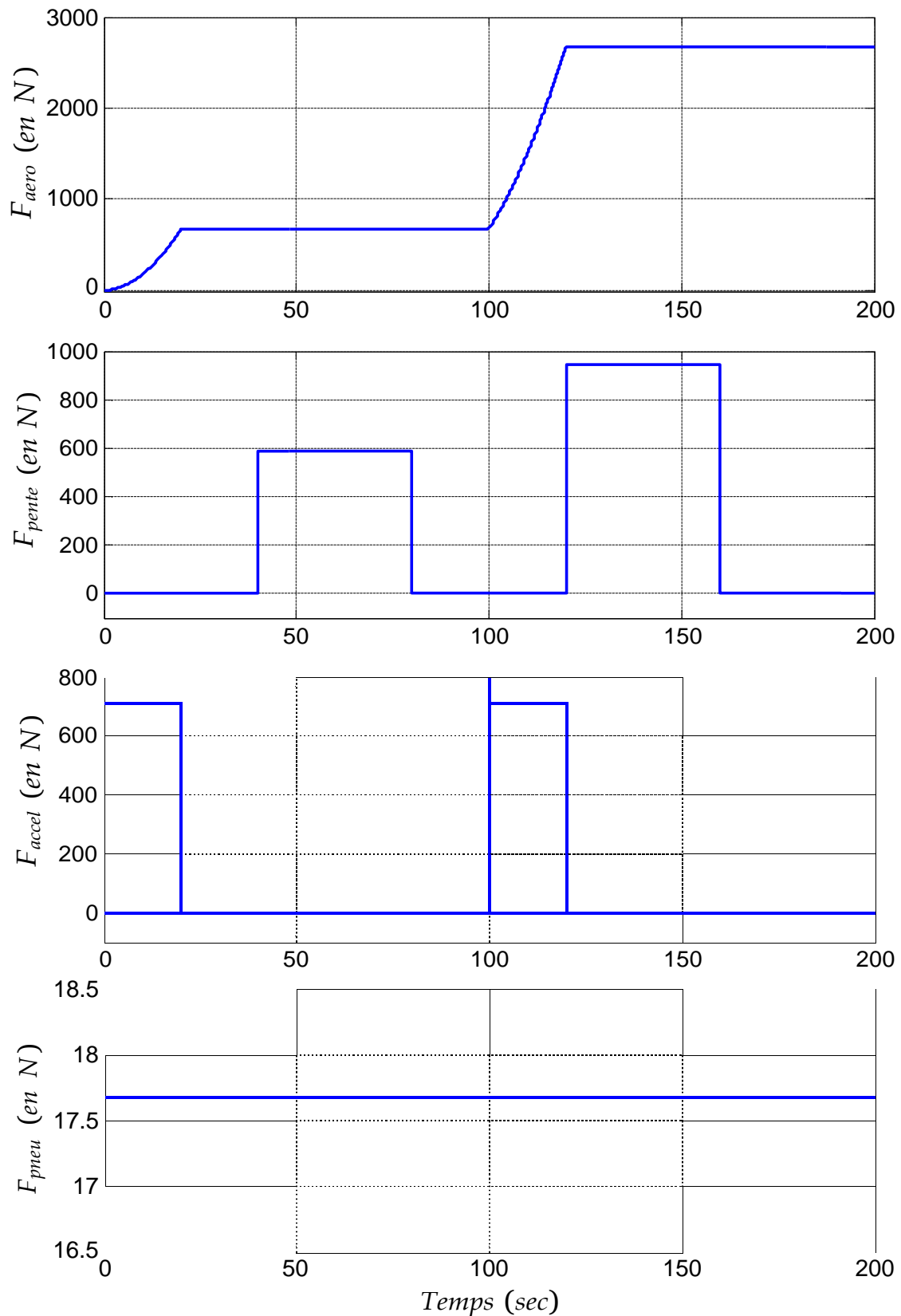


Figure (II.5) : Forces appliquées au véhicule

II.2.1.2. Les équations du couple et de la vitesse :

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

$$\Omega_{trans}(t) = \frac{1}{R_{roue}} V_{veh_moyen} (F_{aéro} + F_{pneu} + F_{pente} + F_{accel}) \tag{II.8}$$

$$C_{trans}(t) = R_{trans}(t) \cdot \frac{1}{\eta_{cardan}} \tag{II.9}$$

Avec:

- Ω_{trans} : Vitesse des roues et du bloc différentiel [rad / s].
- C_{trans} : Couple nécessaire au bloc différentiel [Nm].
- η_{cardan} : Rendement des joints de cardan.
- R_{roue} : Rayon de la roue [m].
- V_{veh} : Vitesse véhicule [m / s].
- V_{veh_moyen} : Vitesse véhicule moyenne entre 2 points du cycle [m/s], on prend la moyenne pour pouvoir intégrer l'accélération qui nécessite 2 points (t et $t+1$).
- $F_{aéro}$: Force liée à la résistance aérodynamique [N].
- F_{pneu} : Force liée à la résistance au roulement des pneus [N].
- F_{pente} : Force liée à la pente de la route [N].
- F_{accel} : Force liée à l'accélération [N].

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



Figure (II.6): Représentation simplifiée du modèle mécanique du véhicule.

En tenant compte des conditions de roulage donnés par la figure II.4 et des forces obtenues par la figure II.5 (les paramètres du véhicule sont donnés par l'annexe 1) les résultats obtenues à partir

du modèle précédents du véhicule, qui sont le couple, la vitesse et la puissance demandés à la sortie du système transmission, sont les suivants :

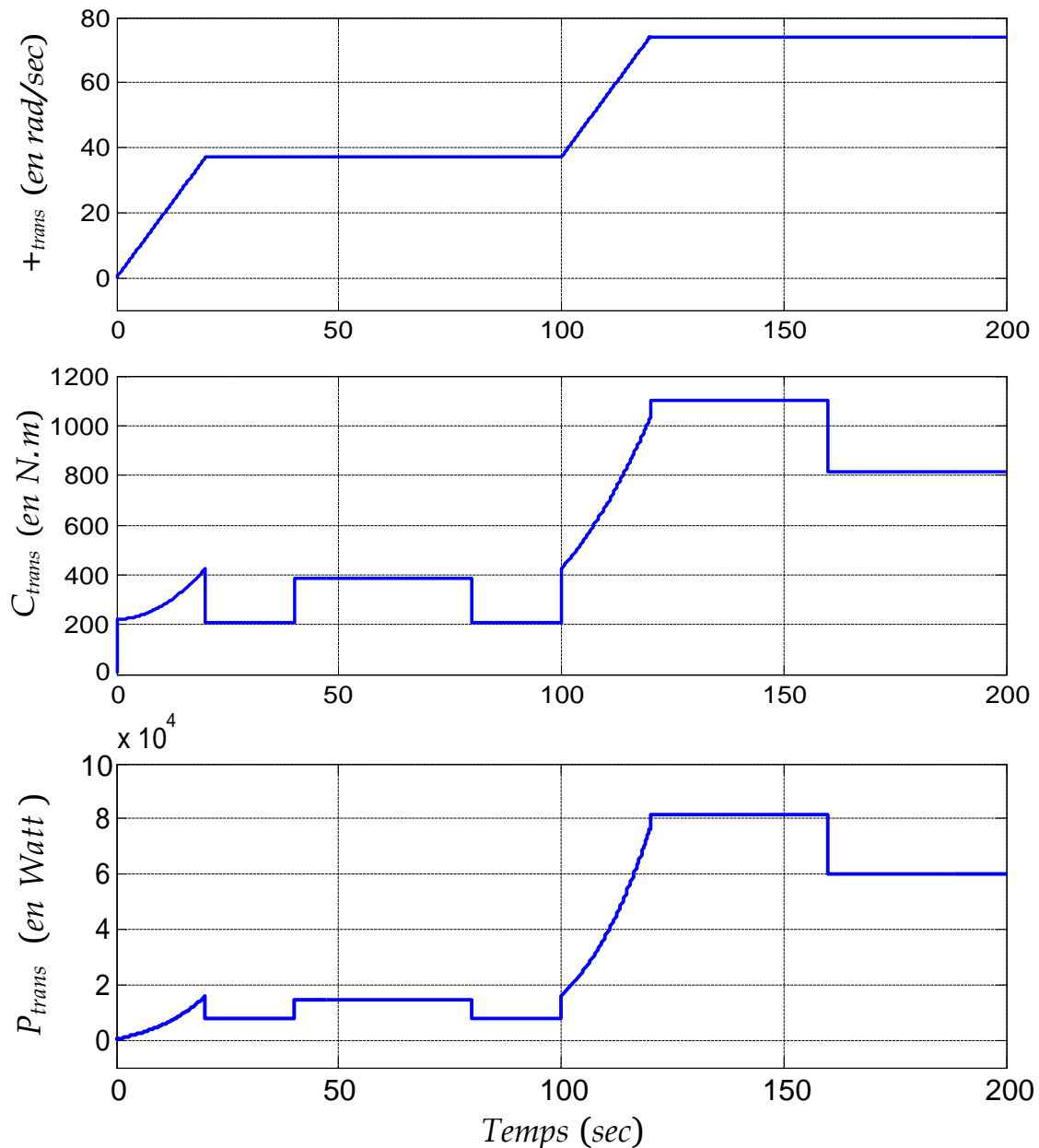


Figure (II.7) : Couple, vitesse et puissance de transmission.

II.2.2. Model de transmission :

D'une manière générale, la transmission désigne l'ensemble du système permettant de transmettre le couple et la puissance du moteur aux roues. Ce système est donc situé entre le moteur et les roues motrices du véhicule. En plus de son rôle de transmission du couple moteur aux roues. Un système de transmission comprend l'ensemble des mécanismes situés entre le moteur et les roues motrices, il peut être constitué d'un train d'engrenage, d'un différentiel, d'un

cardan ... etc. La figure suivante donne le schéma cinématique d'un système de transmission d'un véhicule.[13]

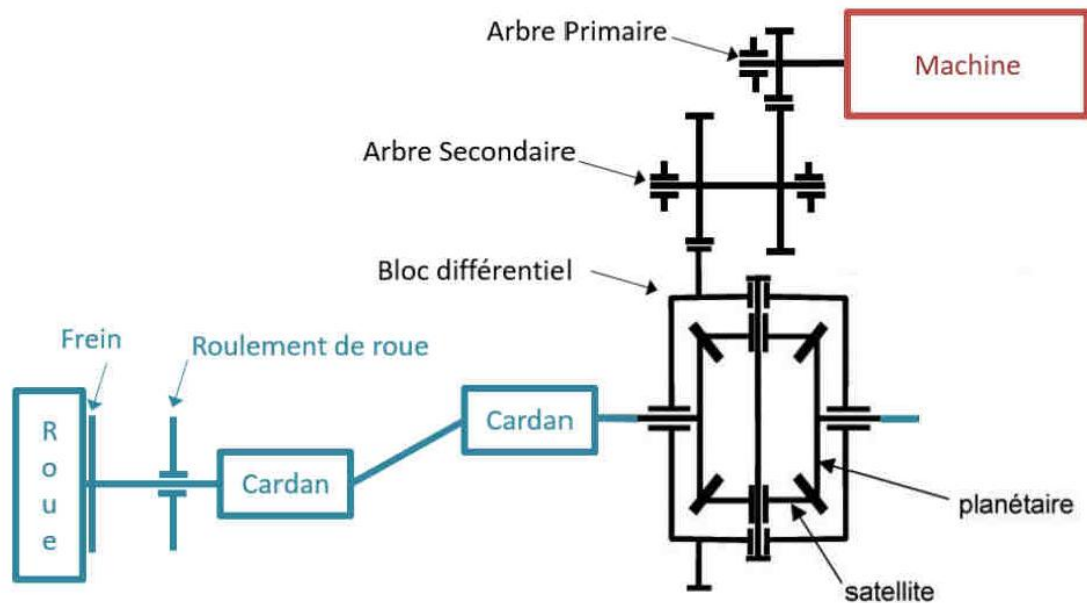


Figure (II.8): Schéma cinématique d'un système de transmission.

Le modèle de la transmission doit permettre d'estimer le couple et la vitesse demandée à la machine. La vitesse du moteur est simplement la vitesse de la roue multipliée par les rapports de réduction du train d'engrenage. Le rendement du système de transmission nécessite de calculer les pertes dans les engrenages. Le choix des modèles utilisés est le suivant :

II.2.2.1. Les pertes dans un système de transmission:

Les pertes dans une boîte de vitesse dépendent fortement des écoulements et ils sont difficilement modélisables sans faire appel à des modèles de mécanique des fluides très lourds en temps de calcul [14]. Avec l'objectif de faire varier seulement les rapports de réduction, nous avons choisi d'utiliser un modèle simplifié obtenue à partir d'un réducteur semblable à celui de la figure(II.8), c'est celui de la Renault Zoé. Pour obtenir des rapports de réduction importants, deux étages de réduction sont généralement utilisés.

- ❖ Influence de la température : elle influe sensiblement sur les pertes de la transmission en particulier au travers de la viscosité de l'huile. Il est intéressant ici de pouvoir estimer l'influence de la température sur les pertes pour obtenir les performances désirées pour le véhicule dans différentes conditions extérieures :

- ❖ Modèle thermique : la thermique n'est pas une contrainte forte pour le réducteur ; avoir un modèle thermique a un intérêt limité pour notre étude amont.

❖ Modèle vibro-acoustique : l'ensemble machine/réducteur peut engendrer des vibrations et des bruits qui ne doivent pas dépasser certaines limites. La modélisation de ces vibrations dont la machine est l'origine n'est pas possible et elles sont généralement ignorées.

Le rôle principal d'une transmission reste l'adaptation de la vitesse et du couple en fonction des conditions de roulage et la volonté du conducteur. La figure suivante donne le principe de transmission:

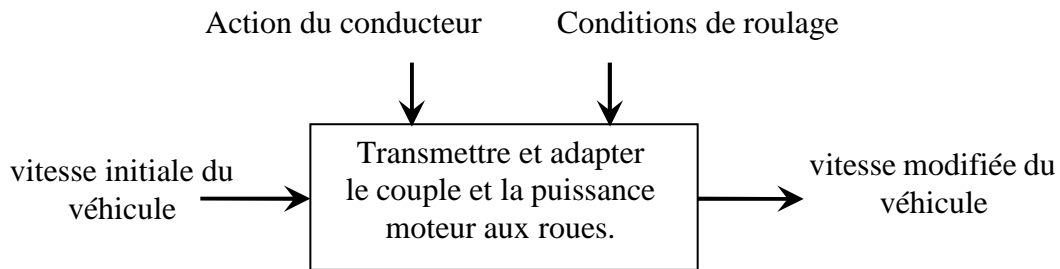


Figure (II.9) : Le système de transmission

II.2.2.2. Les équations de la vitesse et du couple :

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

$$\Omega_{mot} = \Omega_{trans} \cdot \frac{K_{AP}}{K_{BD}} \tag{II.10}$$

Avec :

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

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

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

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

$$C_{mot} = \frac{\Omega_{trans}}{K_{AS/BD}} + \frac{q_{trans}}{\Omega_{mot}} \tag{II.11}$$

$$P_{mot} = C_{mot} \cdot \Omega_{mot} \tag{II.12}$$

Avec :

q_{trans} : pertes dans la transmission [w]

P_{mot} : puissance mécanique demandée au moteur [w]

C_{mot} : Couple demande au moteur [Nm]

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

sorties :

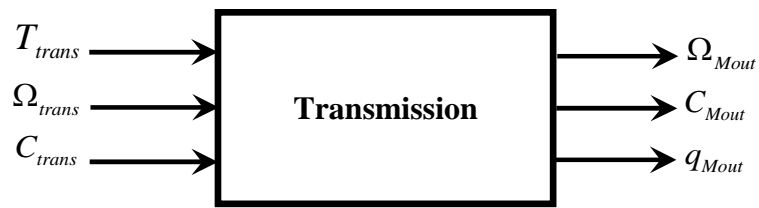


Figure (II.10): Schéma bloc du modèle de transmission.

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

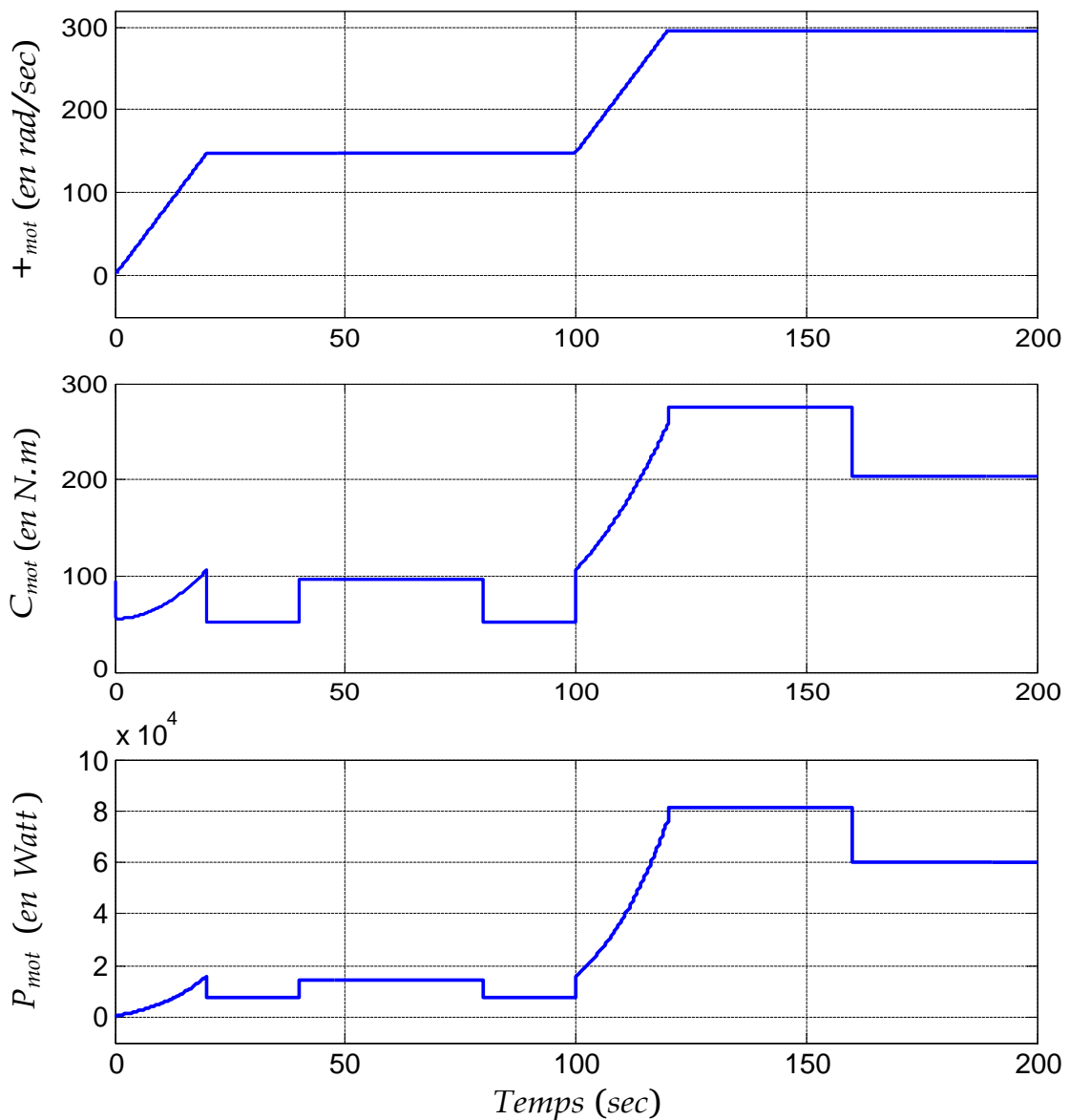


Figure (II.11) : Couple, vitesse et puissance coté moteur.

II.2.3. Modélisation de la machine électrique :

Le véhicule électrique doit son nom au fait que la traction est assurée par une machine électrique contrairement au véhicule conventionnel où cette dernière est effectuée par un ensemble d'engrenages rattachés à un moteur thermique. Les machines électriques utilisées dans les véhicules électriques sont multiples, comme nous avons déjà parlé en premier chapitre, des machines à courant continu aux machines spéciales en passant par les machines synchrones et asynchrones, chaque modèle de véhicule contient un type de machine. Dans notre travail on va s'intéresser à la traction assurée par la machine asynchrone dont ces avantages sont donnés sur le tableau I.1 [16][17].

II.2.3.1. Machine asynchrone :

Dans cette partie de modélisation, et dans un premier lieu, on va donner de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on va présenter la réduction de l'ordre du système par la transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé[17].

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la machine asynchrone par :

- La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices données au dessous.
- La simplification de ces équations par l'introduction de la transformation de Park.

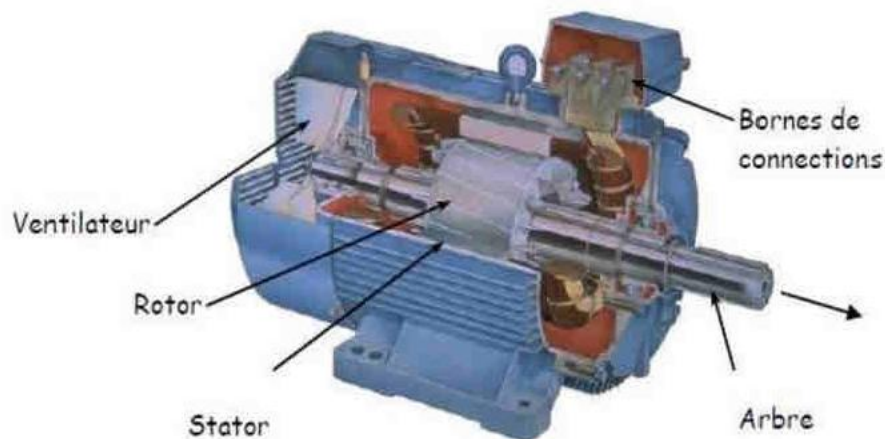


Figure (II.12): Constitution de La machine asynchrone

II.2.3.2. Hypothèses simplificatrices :

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont :

- Les circuits magnétiques sont symétriques.
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- L'entrefer est constant.
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants .
- L'effet de l'encoche est négligeable
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

II.2.3.3. Modélisation de la Machine dans le plan triphasé abc :

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la Figure(II.13) et dont les phases sont repérées respectivement par SA, SB, SC. L'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases SA et Ra choisis comme axes de référence [17].

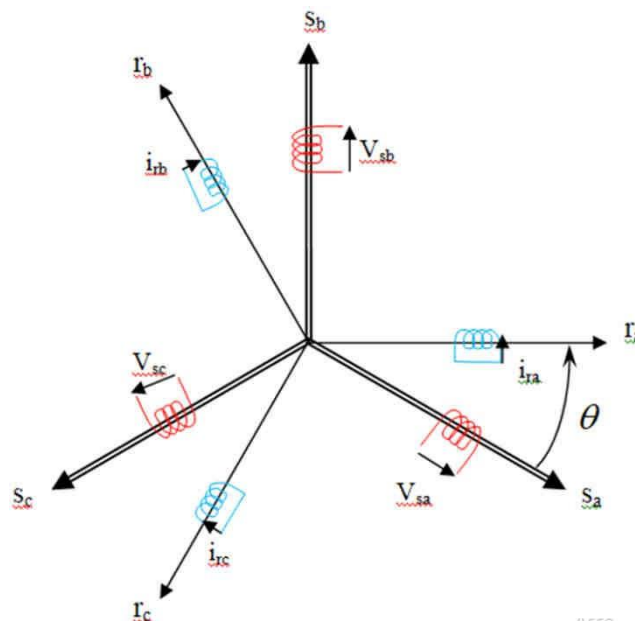


Figure (II.13) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

II.2.3.3.1. Équations générales de la machine en triphasée :

Si on considère que le moteur à induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur seront [16] données par la suite. On va commencer par l'application de la loi de Faraday :

$$V = R \cdot i + \frac{d\Phi}{dt} \tag{II.13}$$

avec :

- V : Tension
- R : Résistance
- i : Courant
- Φ : Flux

A-Equations électriques :

Au stator : Les tensions des trois phases statoriques sont données par :

$$v_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\Phi_{sr}}{dt} \quad (\text{II.14.a})$$

$$v_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\Phi_{sr}}{dt} \quad (\text{II.14.b})$$

$$v_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\Phi_{sr}}{dt} \quad (\text{II.14.c})$$

avec :

- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tension statorique dans les phases a, b et c
- R_s : Résistance statorique par phase
- i_{sabc} : Courant statorique dans les phases a, b et c
- $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Flux statorique

Au rotor : L'écriture des tensions pour les trois phases rotoriques est résumé par :

$$v_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{rr}}{dt} \quad (\text{II.15.a})$$

$$v_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rr}}{dt} \quad (\text{II.15.b})$$

$$v_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rr}}{dt} \quad (\text{II.15.c})$$

avec :

- V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tension rotorique dans les phases a, b et c
- R_r : Résistance rotorique par phase
- i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courant rotorique dans les phases a, b et c
- $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Flux rotoriques

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont alors nulles, les équations II.15 devient :

$$v_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{rr}}{dt} = 0 \quad (\text{II.16.a})$$

$$v_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rr}}{dt} = 0 \quad (\text{II.16.b})$$

$$v_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rr}}{dt} = 0 \quad (\text{II.16.c})$$

Et parce que les trois enroulements sont identiques :

$$R_r = R_{ra} = R_{rb} = R_{rc}$$

B. Equation magnétique :

Au stator : Les flux de phases statoriques sont :

$$\Phi_{sa} = L_s \cdot i_{sa} + M_{sr} \cdot i_{ra} \quad (\text{II.17.a})$$

$$\Phi_{sb} = L_s \cdot i_{sb} + M_{sr} \cdot i_{rb} \quad (\text{II.17.b})$$

$$\Phi_{sc} = L_s \cdot i_{sc} + M_{sr} \cdot i_{rc} \quad (\text{II.17.c})$$

avec :

L_s : inductance de stator

M_{sr} : inductance cyclique mutuelle stator-rotor

Au rotor : Les flux rotoriques sont :

$$\Phi_{ra} = L_r \cdot i_{ra} + M_{rs} \cdot i_{sa} \quad (\text{II.18.a})$$

$$\Phi_{rb} = L_r \cdot i_{rb} + M_{rs} \cdot i_{sb} \quad (\text{II.18.b})$$

$$\Phi_{rc} = L_r \cdot i_{rc} + M_{rs} \cdot i_{sc} \quad (\text{II.18.c})$$

Pour réduire l'ordre du système et fait rendre les équations indépendantes du temps on introduit la transformation de Park.

II.2.3.4. Transformation de Park :

A cause de la complexité et le non linéarité des équations précédentes il est indispensable de transformer le système triphasé équilibré (a,b,c) en un système biphasé (d,q) par la transformation de Park. A condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée.

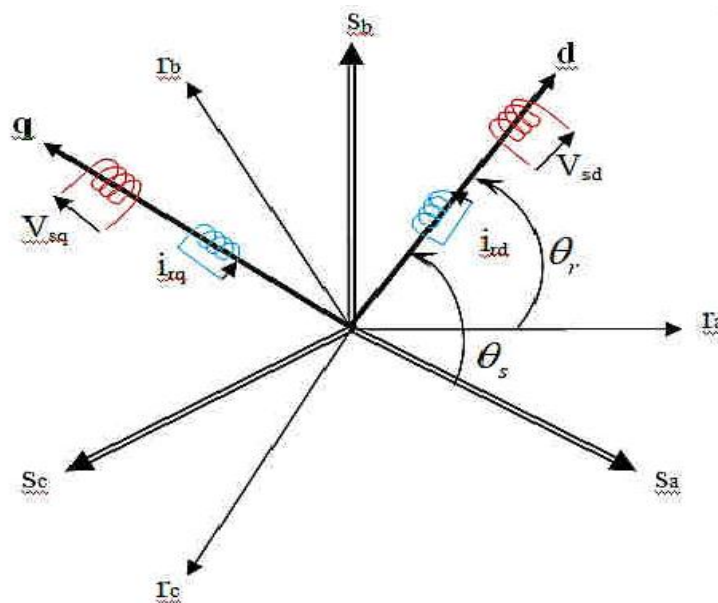


Figure (II.14): Transformation de Park

La transformation de Park normalisée est obtenue à l'aide de la matrice de passage :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Alors les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées (d, q) par transformation inverse comme suit :

$$[a \ b \ c] = [p(\theta)]^{-1} [d, q] \quad (\text{II.20})$$

Avec :

L'angle θ correspond à la position du repère choisi pour la transformation.

$\theta = \theta_s$: pour le stator (angle entre l'axe od et la phase a du stator);

$\theta = \theta_r$: pour le rotor (angle entre l'axe od et la phase a du rotor);

La composante homopolaire est nulle, pour un système triphasé équilibré.

Dans ces conditions les équations électriques et magnétiques deviennent :

A. Equations électriques :

Les équations aux tensions deviennent :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_{coord} \cdot \Phi_{sq} \quad (\text{II.21.a})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_{coord} \cdot \Phi_{sd} \quad (\text{II.21.b})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_{coord} - \omega_r) \cdot \Phi_{rq} \quad (\text{II.21.c})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - (\omega_{coord} - \omega_r) \cdot \Phi_{rd} \quad (\text{II.21.d})$$

avec :

V_{sd} et V_{sq} : tension statorique des axes dq

V_{rd} et V_{rq} : tension rotorique des axes dq (sont nuls si le rotor étant en court-circuit.)

i_{sd} et i_{sq} : courant statorique de l'axe dq

i_{rd} et i_{rq} : courant rotorique de l'axe dq

Φ_{sd} et Φ_{rd} : flux statorique de l'axe dq

Φ_{rd} et Φ_{rq} : flux rotorique de l'axe dq

et :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} ; \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} ; \omega_{coord} = \frac{d\theta}{dt} .$$

B. Equations magnétiques :

L'écriture des flux devient:

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \quad (\text{II.22.a})$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \quad (\text{II.22.b})$$

$$\Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \quad (\text{II.22.c})$$

$$\Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \quad (\text{II.22.d})$$

où, $L_s = l_s - M$; $L_r = l_r - M$; $M = \frac{3}{2} M_0$.

Pour que le modèle soit complet, on doit lui adjoindre l'équation mécanique.

C. Equation mécanique :

L'étude du comportement de la machine asynchrone aux différents régimes de fonctionnement en particulier, le régime transitoire met en évidence l'équation du mouvement qui est définie comme suit :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \quad (\text{II.23})$$

Donc le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante:

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.24})$$

II.2.3.5. Choix du repère

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (d, q) qui fait un angle électrique θ_s avec le stator et qui fait également un angle électrique θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs c'est à dire qu'il est libre.

Il existe trois choix important. On peut fixer le repère (d, q) au stator, au rotor ou au champ tournant. Rappelons que le repère (d, q) est le repère mobile c'est-à-dire qu'il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park θ_s et θ_r afin d'effectuer les rotations.

II.2.3.5.1. Définition des référentiels

Il existe différentes possibilités pour le choix de l'orientation du repère d'axe qui dépendent généralement des objectifs de l'application. On peut choisir le référentiel le mieux adapté aux problèmes posés, Le choix se ramène pratiquement à trois référentiels orthogonaux.

- Référentiel des axes (α, β) : système biphasé à axes orthogonaux ($\theta = 0$)
- Référentiel tournant des axes (d, q) : système biphasé à axes orthogonaux ($\theta = \theta_s$)
- Référentiel des axes (x, y) : système biphasé à axes orthogonaux ($\theta = \theta_r$).

Avec l'angle θ : est une position quelconque d'observation que l'on peut choisir de trois manières différentes [16].

A. Référentiel fixe par rapport au stator

Ce système d'axe est immobile par rapport au stator, dans ce cas $\omega_c = \frac{d\theta_c}{dt} = 0$, et les axes (d, q) sont notés (α, β) . Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$V_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\Phi_{s\alpha}}{dt} \quad (\text{II.25.a})$$

$$V_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + \frac{d\Phi_{s\beta}}{dt} \quad (\text{II.25.b})$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{r\beta} \quad (\text{II.25.c})$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\beta} + \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{r\alpha} \quad (\text{II.25.d})$$

Ce système peut être utilisé pour régime de démarrage et freinage (dynamique) des machines asynchrones et des transformateurs.

B. Référentiel fixe par rapport au rotor

Ce système d'axe est immobile par rapport au rotor, dans ce cas $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = \omega_{\text{coor}}$, et les axes (d, q) . Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$V_{sx} = R_s \cdot i_{sx} + \frac{d\Phi_{sx}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{sy} \quad (\text{II.26.a})$$

$$V_{sy} = R_s \cdot i_{sy} + \frac{d\Phi_{sy}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{sx} \quad (\text{II.26.b})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rx} + \frac{d\Phi_{rx}}{dt} \quad (\text{II.26.c})$$

$$0 = R_r \cdot i_{ry} + \frac{d\Phi_{ry}}{dt} \quad (\text{II.26.d})$$

Ce système est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones.

C. Référentiel fixe par rapport au champ tournant

Ce système d'axe est immobile par rapport au stator, dans ce cas :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_{coord} = \omega_s, \omega = \omega_{coord} - \omega_r = \omega_s - \omega_r, \text{ et les axes } (d, q).$$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \quad (\text{II.27.a})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \quad (\text{II.27.b})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{rq} \quad (\text{II.27.c})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{rd} \quad (\text{II.27.d})$$

Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquences variables, comme il est utilisé notamment dans la commande des machines électriques dans les systèmes en boucle fermée où les grandeurs à contrôler sont obligatoirement continues.

Suite à l'application de la transformation de Park, les grandeurs physiques : flux, courant, tension, ne sont plus alternatives, mais elles deviennent continues. La description de l'état magnétique des machines à courant alternatif dans le référentiel (d, q) nous conduit à un modèle électromagnétique unifié valable pour toutes les machines standards: machine asynchrone à rotor bobiné ou à cage, machine synchrone à pôles lisses ou à pôles saillants, machines à aimant permanent et machine à réluctance.

Dans notre cas, nous avons choisi le repère immobile par rapport au stator et les équations de la machine sont regroupées alors comme suit :

$$V_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + \frac{d\Phi_{s\alpha}}{dt} \quad (\text{II.28.a})$$

$$V_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + \frac{d\Phi_{s\beta}}{dt} \quad (\text{II.28.b})$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\alpha} + \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{r\beta} \quad (\text{II.28.c})$$

$$0 = R_r \cdot i_{r\beta} + \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{r\alpha} \quad (\text{II.28.d})$$

$$\Phi_{s\alpha} = L_s.i_{s\alpha} + M.i_{r\alpha} \tag{II.29.a}$$

$$\Phi_{s\beta} = L_s.i_{s\beta} + M.i_{r\beta} \tag{II.29.b}$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_r.i_{r\alpha} + M.i_{s\alpha} \tag{II.29.c}$$

$$\Phi_{r\beta} = L_r.i_{r\beta} + M.i_{s\beta} \tag{II.29.d}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{pM}{JL_r} (\Phi_{rd}.i_{sq} - \Phi_{rq}.i_{sd}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{f}{J} \Omega \tag{II.30}$$

II.2.3.6. Simulation du fonctionnement de la machine

Les machines électriques utilisées dans les chaînes de traction pour les véhicules électriques sont des machines de grandes puissances allant jusqu'à 100KW dans beaucoup de modèle. Pour le véhicule dont nous avons utilisé, la puissance du moteur électrique est de 80KW. Les paramètres de la machine utilisée dans cette partie de travail sont donnés dans l'Annexe 3. Dans les véhicules électriques les machines sont alimentées par des onduleurs de tension, mais dans cette partie, on va simuler le fonctionnement de la machine directement par une source triphasé de 50Hz. Les résultats de simulation du fonctionnement sont donnés par les deux figures suivantes :

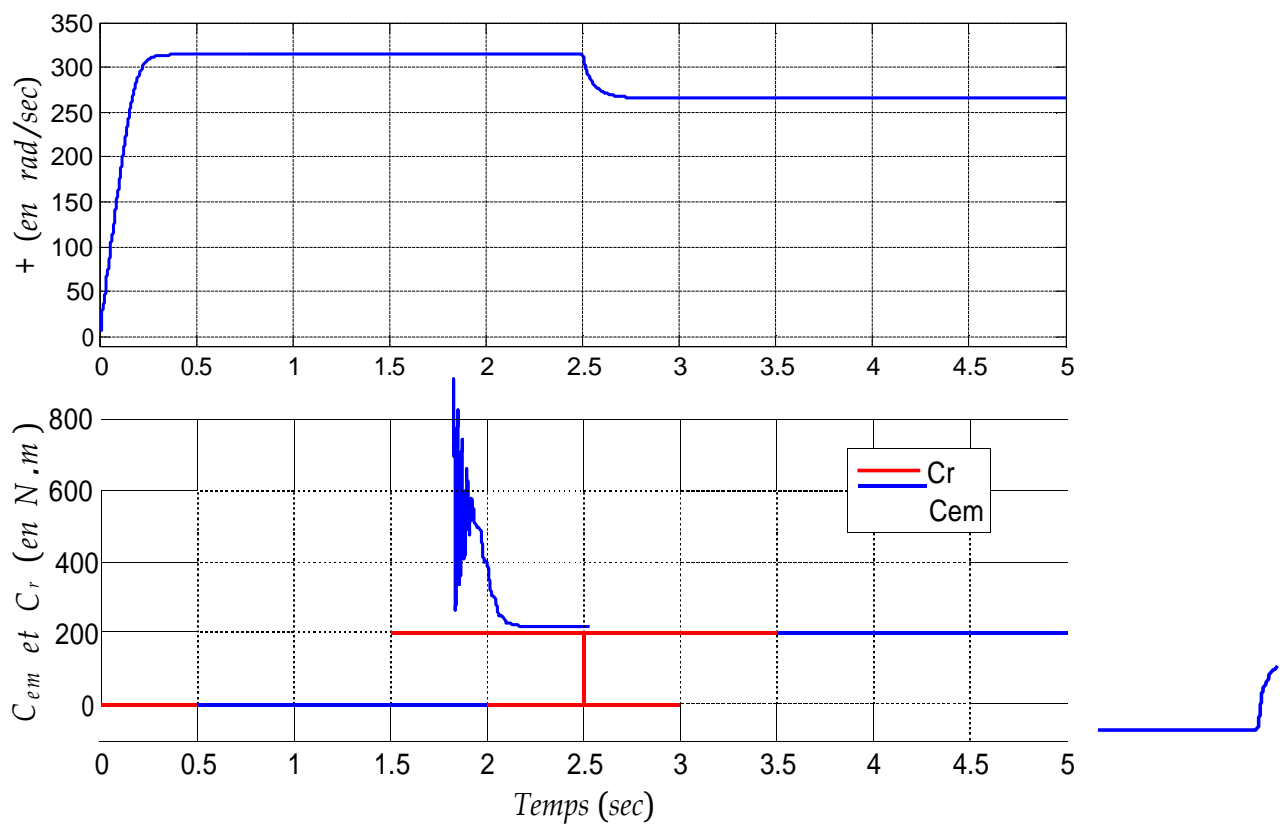


Figure (II.15): Grandeurs mécanique de MAS

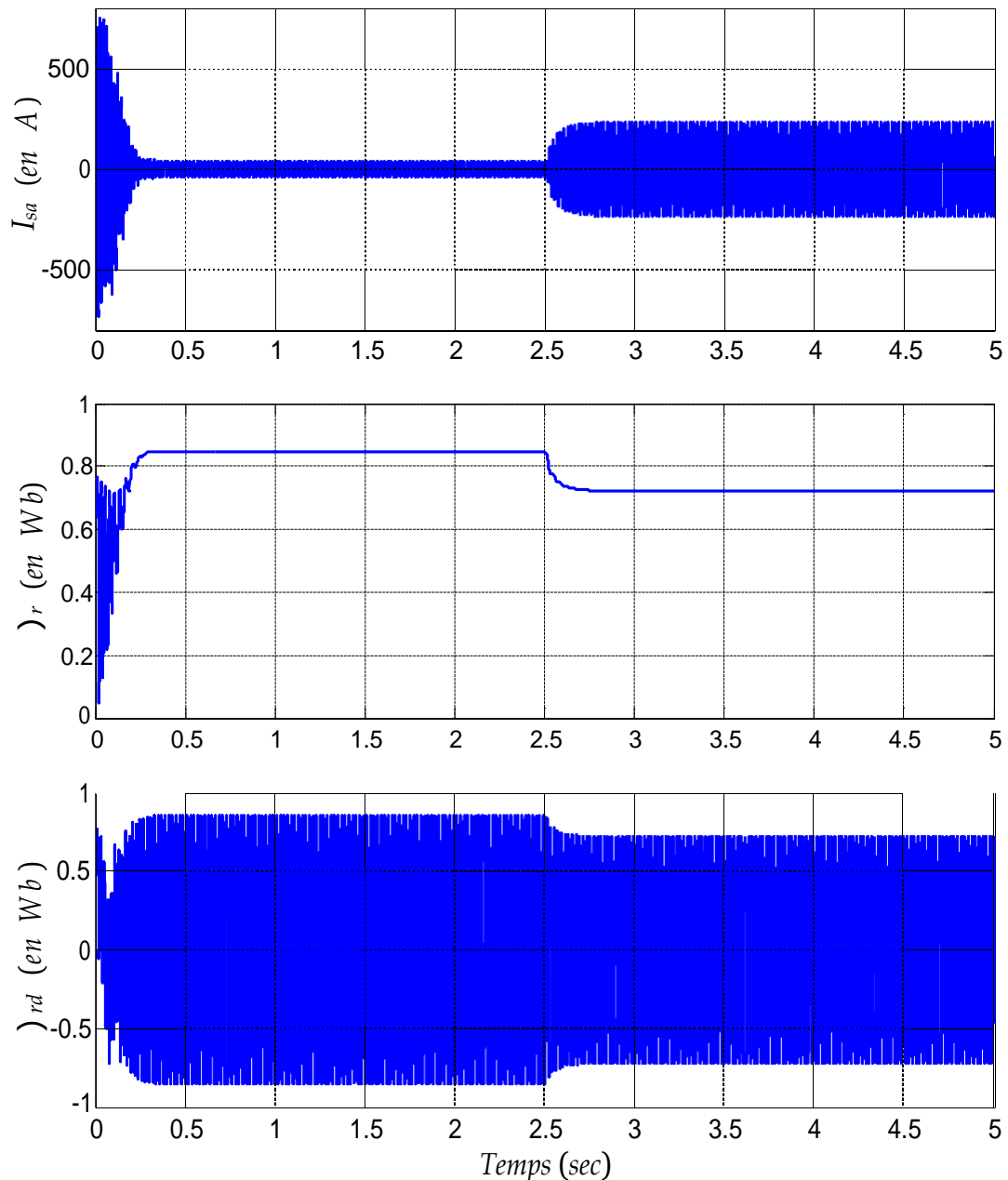


Figure (II.16): Grandeurs électromagnétiques de la machine

Les résultats obtenus montrent que la vitesse augmente pour atteindre une valeur proche de la vitesse de synchronisme (314rad/s). Pendant le régime transitoire, les courants et le couple électromagnétique présentent des fortes oscillations, après ils se stabilisent, pour le couple à une valeur nulle (démarrage à vide). Les flux rotoriques et statoriques sont sinusoïdales d'amplitudes presque constantes. A partir de l'instant 2.5 secondes, où nous avons inséré un couple de charge important de 200 N.m, on a remarqué une décroissance de la vitesse, et en conséquence de l'amplitude de flux, le couple électromagnétique rejoint la valeur du couple de charge. Les résultats de simulation sont satisfaisants et le modèle utilisé montre très corrects.

II.2.4. Etude de l'onduleur de tension :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication...) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,...) [18].

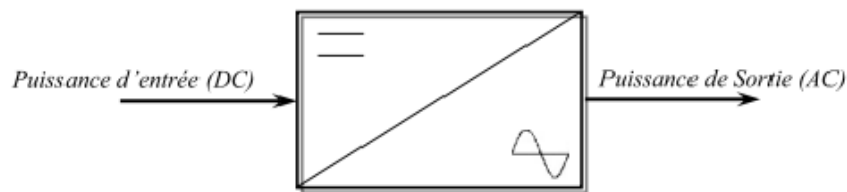
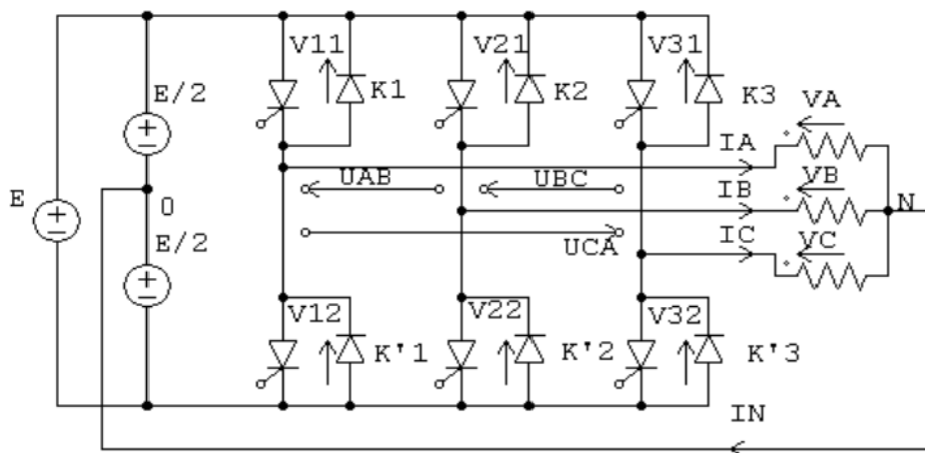


Figure (II.17) : Schéma de principe de l'onduleur.

II.2.4.1. Structure de l'onduleur de tension triphasé :

Un onduleur de tension est constitué de composants semi-conducteurs contrôlables généralement par des transistors IGBT pour les grandes puissances (ou des thyristors GTO), voir annexe 4, [19]. On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés de l'un ou de l'autre, il suffit de décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases. La figure (II.18) représente un onduleur de tension triphasé à deux niveaux formés de trois demi ponts monophasés et utilisant un diviseur capacitif commun.



Figure(II.18). Onduleur de tension triphasé avec liaison NO.

Chacune des tensions de sortie est égale tantôt à $\begin{pmatrix} + \\ \frac{E}{2} \end{pmatrix}$, tantôt à $\begin{pmatrix} - \\ \frac{E}{2} \end{pmatrix}$. Les interrupteurs

fonctionnent comme en monophasé la seule différence est que le courant arrivant au point milieu du diviseur est IN telle que $IN = IA + IB + IC$.

La présence de neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple), on peut supprimer la liaison entre le point neutre 'N' de la charge et le point milieu 'O' du diviseur capacitif, en supprimant celle-ci on obtient alors l'onduleur de tension en pont triphasé proprement dit représenté sur la figure (II.19).

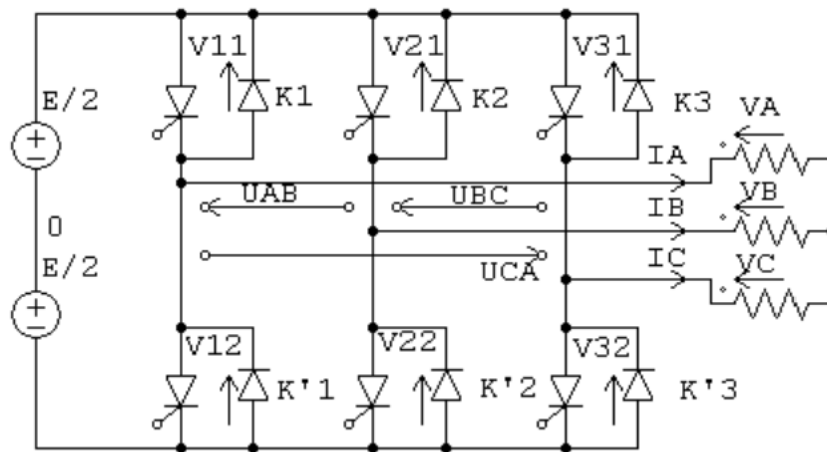


Figure (II.19): Onduleur de tension en pont triphasé (équilibré).

Il existe deux conditions pour le bon fonctionnement de ces onduleurs:

- Les interrupteurs montés sur le même bras ne doivent pas conduire en même temps à fin d'éviter le court-circuit et d'assurer la continuité de courant alternatif dans la charge.
- Les tensions générées par l'onduleur doivent être décalées entre elles d'un de l'angle $\frac{2\pi}{3}$.
- Les diodes utilisées sont des diodes à roue libre assurant la protection des transistors.

II.2.4.2. Principe de fonctionnement:

Les interrupteurs d'un bras sont complémentaire l'un a l'autre donc il y a deux cas:

- K_2 est ouvert: donc K_1 est en état de conduction, la tension appliquée a la charge est égale à $\frac{E}{2}$. Si le courant est positif, il traversera K_1 et l'énergie se transfert de la source

vers la charge, et si le courant est négatif, traversera la diode D_1 donc, l'énergie retourne à la source continue.

- K_1 est ouvert: donc K_2 est en état de conduction, la tension appliquée a la charge est égale à $-\frac{E}{2}$. Si le courant est positif, il passera par D_2 et on aura un retour de l'énergie à la source continue, et si le courant est négatif, il traversera K_2 donc, l'énergie se transfert de la source vert la charge.

II.2.4.3. Modèle mathématique de l'onduleur de tension:

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'association de l'onduleur triphasé à deux niveaux avec une charge triphasée couplée en étoile avec neutre isolé.

L'état des interrupteurs, supposé parfaits, peut être défini par trois grandeurs de commande:

S_i ($i = a, b, c$) et peu prendre 2 valeurs:

- $S_i = 1$: Le cas ou l'interrupteur de haut est fermé (K_i fermé) et celui d'en bas est ouvert (K'_i ouvert).
- $S_i = 0$: Le cas ou l'interrupteur de haut est ouvert (K_i ouvert) et celui d'en bas est fermé (K'_i fermé).

Dans ces conditions on peut écrire les tensions v_{io} en fonction des signaux de commande S_i et en tenant compte du point fictif "o" représenté sur la figure (II. 18).

$$V_{io} = E \left(S_i - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{II. 31})$$

Les tensions composées U_{AB} , U_{BC} et U_{CA} sont obtenues à partir de ces relation:

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{A0} - V_{OB} = V_{A0} - V_{B0} \\ U_{BC} = V_{B0} - V_{OC} = V_{B0} - V_{C0} \\ U_{CA} = V_{C0} - V_{OA} = V_{C0} - V_{A0} \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

On veut connaître la forme des tensions de phase par rapport au neutre de la charge N :

- Si: le neutre de la charge N est connecté au neutre de la source "O" on a: $V_{ON} = 0$ alors:

$$\begin{cases} V_{AN} = V_{AO} + V_{ON} = V_{AO} \\ V_{BN} = V_{BO} + V_{ON} = V_{BO} \\ V_{CN} = V_{CO} + V_{ON} = V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

➤ Si: le neutre de la charge est isolé de celui de la source "O" on a:

$$\begin{cases} V_{AN} = V_{AO} + V_{ON} \\ V_{BN} = V_{BO} + V_{ON} \\ V_{CN} = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (\text{II. 34})$$

Le système V_{AN} , V_{BN} et V_{CN} étant équilibré, il en découle:

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (\text{II. 35})$$

La substitution de (II. 35) dans (II. 34) aboutit à:

$$V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{II. 36})$$

On remplaçant (II. 36) dans (II. 34), on obtient:

$$\begin{cases} V_{AN} = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_{BN} = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_{CN} = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

On peut écrire l'équation (II. 37) sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 38})$$

Les équations des tensions simples en fonction des grandeurs de commande:

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{II. 39})$$

II.2.4.4. Modulation de largeur d'impulsion (MLI):

Les tensions obtenues à la sortie de l'onduleur étudié précédemment contiennent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour cela on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion, [18]. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) consiste à générer par alternance de la tension alternative, une tension composée de plusieurs créneaux de largeur variables, [19]. Avec la technique MLI, la tension et la fréquence fondamentales peuvent être facilement variées, l'onde de la tension de

sortie contient des harmoniques à haute fréquence, qui sont facilement filtré par l'inductance de fuite de la machine, le rapport entre la tension et la fréquence est maintenu constant pour fournir un flux constant dans l'entrefer de la machine, [18]. Comme la MLI présente des avantages, elle présente des inconvénients:

- L'augmentation des pertes par commutation dues à la haute fréquence de commutation.
- Réduction de la tension disponible.
- Problèmes des interférences électromagnétiques (EMI) dues au haut ordre des harmoniques.

Différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion PWM existent, à savoir : la commande plein onde, la MLI triangulo-sinusoïdale (STPWM), la MLI triangulo-sinusoïdale avec injection du troisième harmonique, la MLI vectorielle (SVPWM) ...etc. Dans notre travail on s'intéresse à la MLI triangulo-sinusoïdale (STPWM), où le principe est la détermination des instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur à partir d'une comparaison d'un signal triangulaire V_p (porteuse) d'amplitude A_p à fréquence élevée f_p avec une sinusoïde modulante V_a d'amplitude A_m à faible fréquence f_m , qui représente l'image du signal souhaité à la sortie de l'onduleur, [18] et [19]. Les points d'intersection entre la porteuse et la modulante déterminent les instants de commutation des interrupteurs, la figure (II.20) représenté la porteuse et la référence.

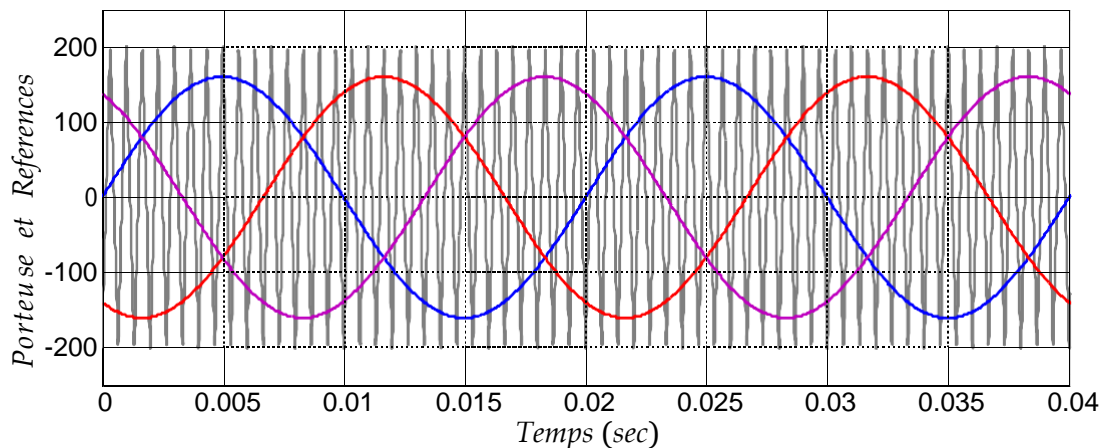


Figure (II.20): Principe de modulation de la technique triangulo-sinusoïdale (STPWM).

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres:

- L'indice de modulation m : qui est le rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_m de la tension de référence : $m = \frac{f_p}{f_m}$.

- Le taux de modulation r : qui est le rapport de l'amplitude V_a du signal sinusoïde à la valeur V_p de la porteuse : $r = \frac{V_a}{V_p}$.

On applique la technique "triangulo-sinusoidale" sur l'onduleur à base d'IGBT donné en haut. Les résultats obtenues sont donnés sur les figures (II.21) et (II.22) qui représentent respectivement les tensions simples V_{AN} , V_{BN} et V_{CN} à la sortie de l'onduleur comparées avec ces tensions de références et les signaux de commande du premier bras de l'onduleur (pour $r = 0.8$, $m = 40$).

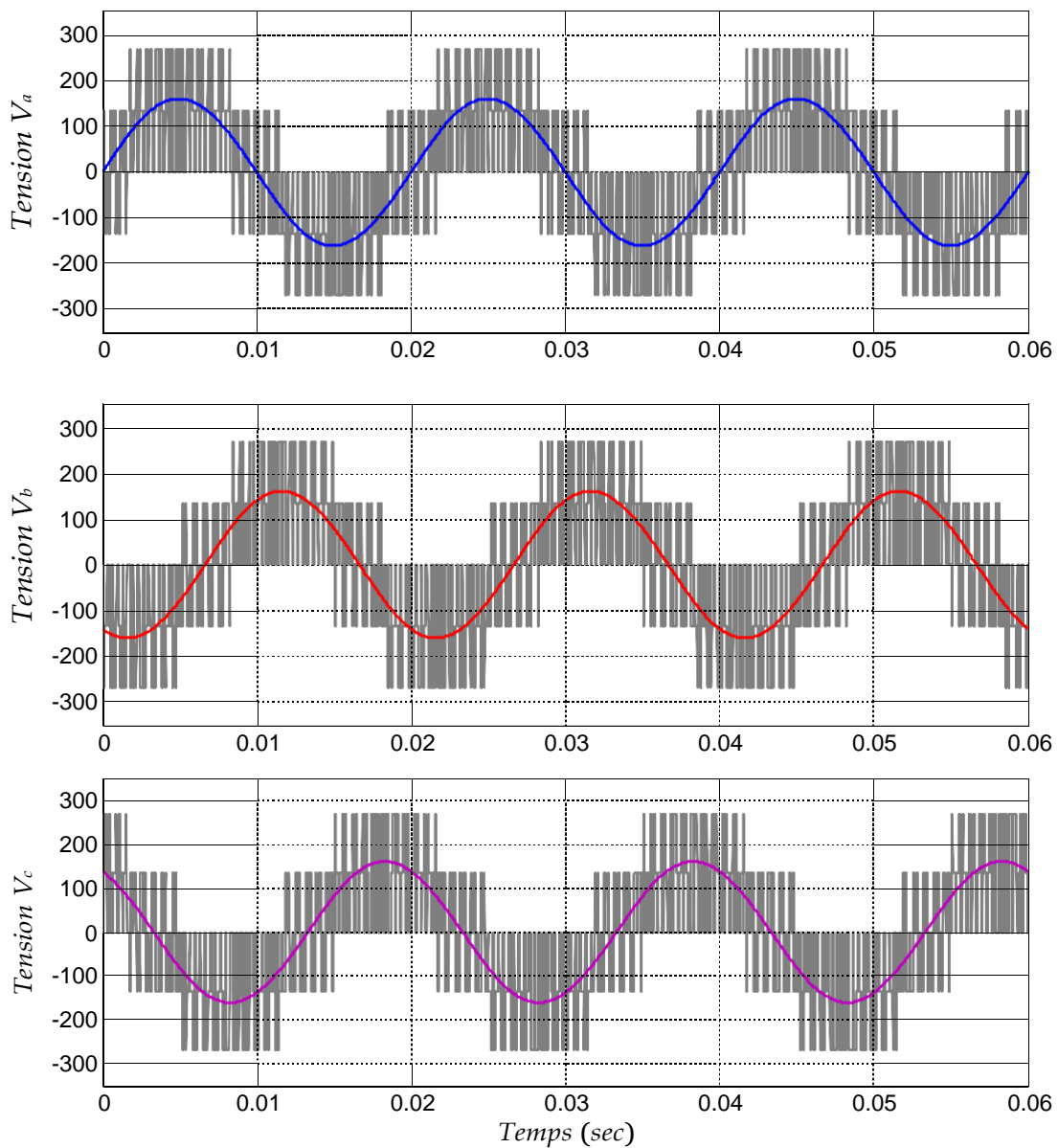


Figure (II.21): Les tensions simples à la sortie de l'onduleur.

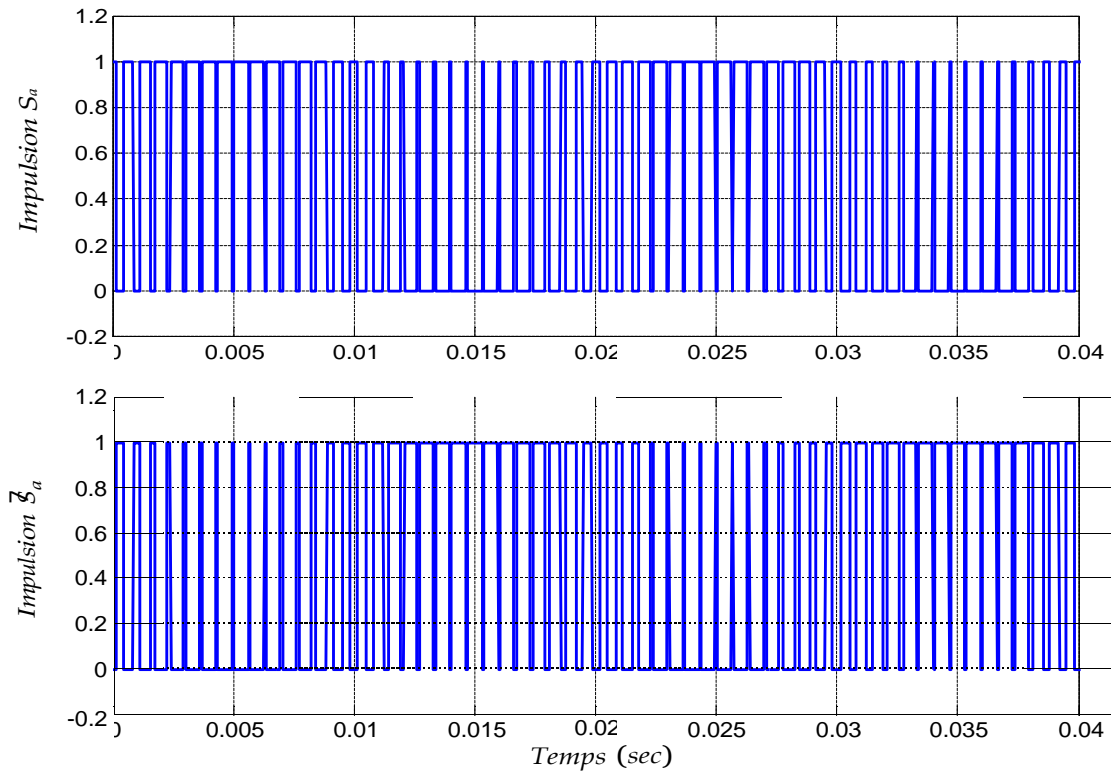


Figure (II.22): Signaux de commande du premier bras de l'onduleur

II.2.5. La batterie :

La batterie est un système de stockage d'électricité sous forme chimique, pouvant fonctionner de manière réversible (en courant pas en tension), caractérisée par sa capacité et son énergie massique, a fin d'alimenter le véhicule d'une façon permanente. L'énergie chimique stockée dans chaque pile est convertie directement en énergie électrique lorsque les bornes de la batterie sont connectées à un consommateur électrique, La figure (II.23) représente et principe et la vue interne d'une batterie.

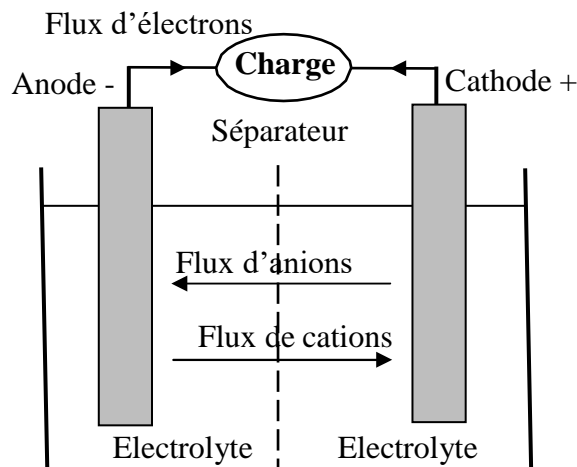


Figure (II.23): Vue interne d'une batterie.

Le principe de fonctionnement de celle-ci est que la réaction chimique entre les électrodes et l'électrolyte provoque une oxydoréduction. Dans ce cas, l'électrode négative subit une oxydation, c'est-à-dire que la réaction chimique libère des électrons, tandis que l'électrode positive subit une réduction, autrement dit elle absorbe des électrons. Ce déséquilibre des charges électriques génère la F.E.M (Force électro Motrice) de l'accumulateur [20].

Il existe des batteries de différentes formes (structure ou technologie), par contre l'utilisation de ces différentes technologies dans les voitures électriques doit respecter certaines conditions, parmi lesquelles :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance /poids en W/kg) permettant des accélérations importantes.
- Une bonne énergie massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles charge/ décharge, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Entretien faible et recyclable.

II.2.5.1. Les différents types de batteries :

Il existe différents types de batteries disponibles à l'heure actuelle sur le marché mais aucune d'elles ne parvient à égaler ou surpasser la densité énergétique des carburants fossiles.

II.2.5.1.1. La batterie Plomb Acide :

C'est la plus ancienne des technologies de batteries et la moins onéreuse actuellement. Inventée en 1859 par le français Gaston Planté et améliorée en 1881 grâce au luxembourgeois Henri Owen Tudor qui la rend plus robuste et efficace en remplaçant les feuilles de plomb baignant dans de l'acide sulfurique par des plaques de plomb enduites d'une pâte active.

Lors de sa charge une batterie au plomb dégage de l'oxygène et de l'hydrogène, la boîte n'étant pas fermée hermétiquement, la batterie doit être utilisée à plat et le niveau d'eau ajusté régulièrement. D'autre part les vapeurs et/ou projections d'acide sulfurique provoquent de la corrosion si l'emplacement de la batterie n'est pas entretenu (avec de l'eau et bicarbonate de soude). Ce type de batterie supporte très mal la décharge complète et la surcharge, elles sont faites pour rester chargées en permanence.

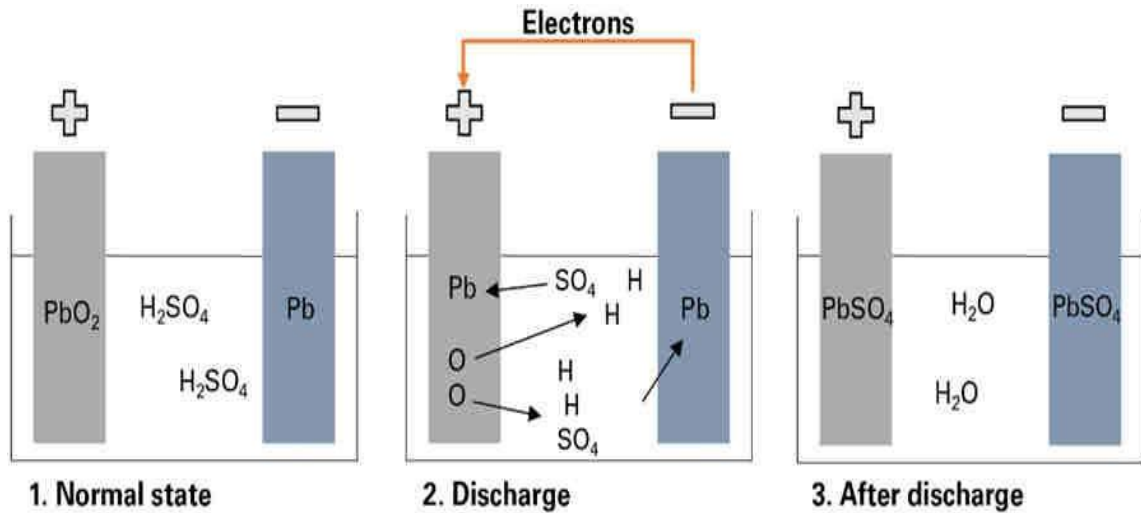


Figure (II.24): Charge et décharge d’une batterie au plomb.

II.2.5.1.2. Les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) :

C’est une technologie très ancienne aussi, inventée par le suédois Waldemar Jungner en 1899. Elle était très répandue pour les appareils électriques nécessitant un courant électrique important comme les téléphones portables ou les appareils photos numériques. Ce type de batterie a une longévité assez importante (environ 1000 cycles) Mais le passage aux puissances et aux tailles de batteries exigés pour la motorisation automobile pose des problèmes de fonctionnement et de fiabilité non encore résolus à ce jour [21].

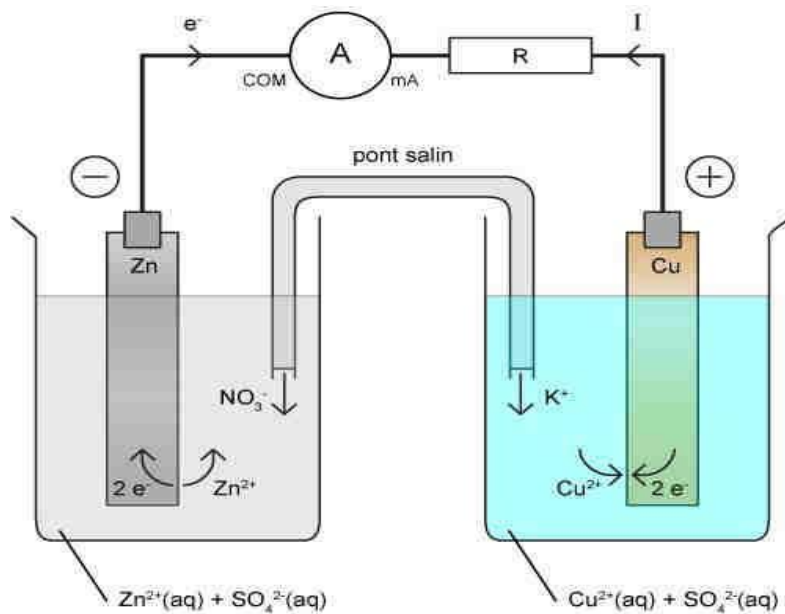


Figure (II.25): Charge et décharge d’une batterie (Ni-Cd).

II.2.5.1.3. Les batteries Nickel-hydrure Métallique (Nickel-Métal hybride Ni-Mh) :

C'est la technologie qui a succédé aux batteries Ni-Cd, commercialisée en 1990, Ces batteries ont une architecture similaire aux batteries Ni-Cd pour une densité énergétique doublée mais une résistance supérieure qui impose une phase de rodage des éléments pour débiter de forts taux de courants. C'est une technologie assez fragile car ne supportant pas la surcharge. Un avantage certain de cette technologie est qu'elle n'a pas d'effet mémoire mais a une capacité d'autodécharge importante. Ce type de batterie est adapté pour une transition vers les voitures électriques mais sa durée de vie n'est pas satisfaisante. La technologie Ni-Mh est la mieux adaptée pour les véhicules électriques grâce notamment à un coût financier qui est plus faible que les batteries Li-ion [21].

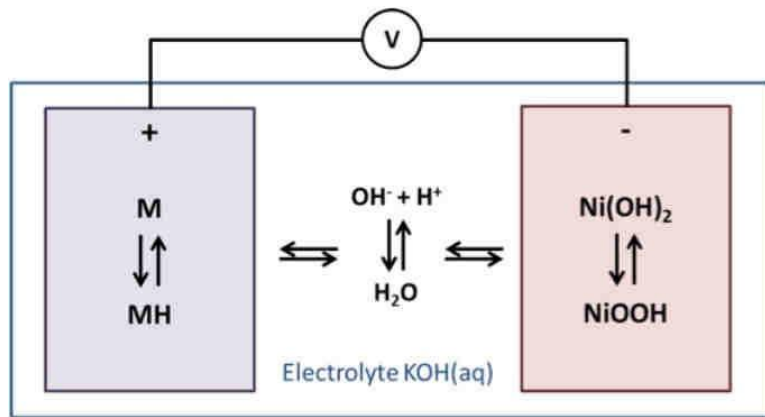


Figure (II.26): schéma de fonctionnement d'une batterie (Ni-MH).

II.2.5.1.4. Les batteries Lithium-ion (Li-ion) :

Actuellement les batteries qui appartiennent à la famille Lithium sont parmi les solutions les plus répandues pour alimenter en électricité de nombreux produits de consommation disponibles sur le marché. Elles possèdent de très fortes densités énergétiques et une importante énergie massique, ce qui favorise leur utilisation dans le secteur du transport et particulièrement pour les véhicules électriques qui nécessitent des batteries à grande capacité. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons aux systèmes de stockage à base de batteries Li-ion parce que c'est le type le plus utilisé dans les systèmes de traction pour véhicules électriques et dans beaucoup de système qui nécessitent le stockage des grandes puissances.

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

Batterie	Plomb Acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion	Li-po
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200	100-130
Nombre de cycles (Charge décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200	400 à 600
Temps de charge	6 à 12h	1h à 2h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h
Température de Fonctionnement	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	0 à 60°C

Tableau (II.1) : Tableau comparatif des différentes technologies de batteries [22].

II.2.5.2. Principe de fonctionnement des batteries Lithium-ion (Li-ion) :

Dans l'accumulateur Li-ion, le lithium est inséré sous forme d'ions (Li +) dans la structure cristalline, généralement en graphite, de l'électrode négative. C'est ce procédé d'insertion qui différencie la batterie Li - ion de la batterie lithium. Pendant la décharge d'une batterie Li-ion la (figure II.27), le lithium est relâché du graphite, migre à travers l'électrolyte pour se loger dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive. A la charge, les ions Li + viennent se replacer dans la structure en graphite. Ce principe de fonctionnement est le même pour tous les types de batteries Li-ion. En revanche, la composition chimique des électrodes et de l'électrolyte varie d'une technologie à l'autre. Ces différences ont un impact sur ce qui fixe leurs caractéristiques en termes d'énergie, puissance, spécifiques ainsi que durée de vie.

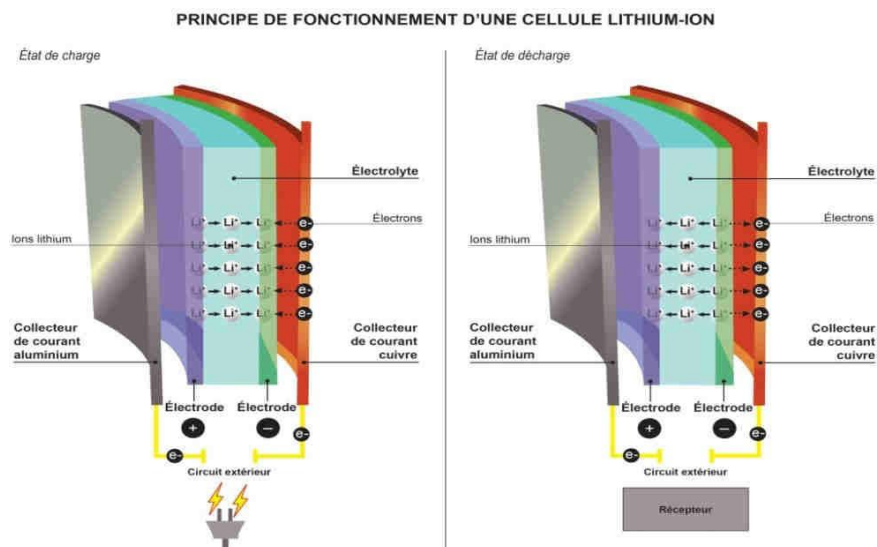


Figure (II.27): Principe de fonctionnement d'une cellule Li-ion (charge, décharge)

II.2.5.3. Modélisation de la batterie :

Dans notre étude, la batterie est modélisée comme un générateur de tension parfait, elle est constituée d'un grand nombre de cellules et pour la modélisation d'une cellule on a deux termes principaux :

- L'état de charge d'une cellule de batterie (SOC).
- Et la tension qui fournie par une cellule (V_{cel}).

II.2.5.3.1. Etat de charge d'une cellule de la batterie (SOC) :

Le SOC (State Of charge), couramment utilisé en génie électrique, est un paramètre estimé pendant que la batterie est traversée par un courant électrique. Le SOC est donné par le rapport entre la capacité actuelle disponible et la capacité totale effective disponible à l'instant qui précède l'utilisation (à ne pas confondre avec la capacité initiale de la batterie neuve) [15].

$$SOC(t) = SOC(t_0) - 100 \cdot \frac{C_N(t)}{C_{N0}} \quad (\text{II.40})$$

$$C_N(t) = \frac{1}{3600} \cdot \int_{t_0}^t I_{cel}(t) \cdot dt \quad (\text{II.41})$$

avec :

- $C_N(t)$: la capacité actuelle de la cellule.
 C_{N0} : la capacité initiale.
 $SOC(t)$: l'état de charge actuel de la cellule.
 $SOC(t_0)$: l'état de charge initial.
 $I_{cell}(t)$: le courant traversant la cellule.

II.2.5.3.2. La tension fournie par une cellule :

La tension d'une cellule dépend du type de technologie utilisé (type de batterie) ; elle peut être variable en fonction de l'état de charge $SOC(t)$ et en fonction de la densité massique des cellules. Dans la littérature, on peut trouver plusieurs courbes qui donnent cette relation de la tension d'une cellule en fonction de l'état de charge de la batterie $SOC(t)$ et de la température T° , elle est nommée OCV (cartographie de tension à vide aux bornes d'une cellule), on peut représenter cette caractéristique par la figure (II.28).

Remarque importante : Une autre caractéristique importante influe sur la tension des batteries, c'est la densité énergétique de la batterie qui est la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou de volume, elle s'exprime en Wh/kg ou en Wh/L.

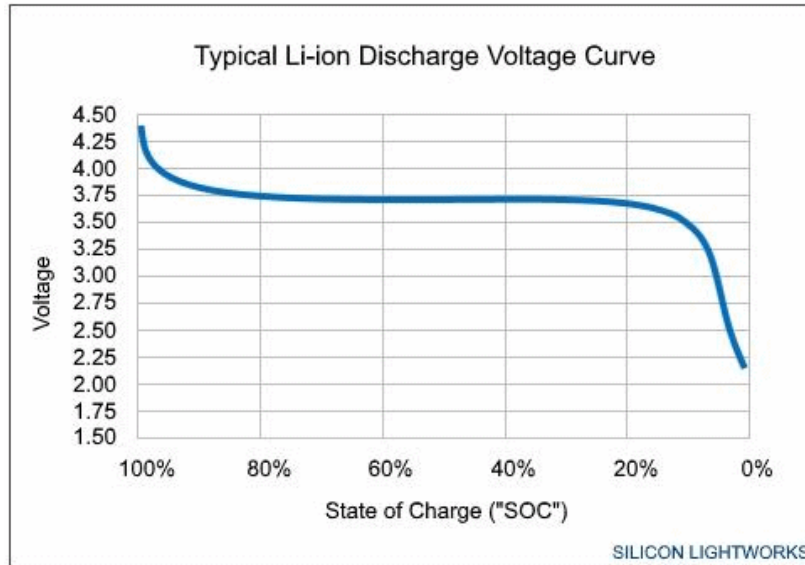


Figure (II.28) : La tension à vide (OCV) aux bornes d’une cellule (Li-ion) en fonction du SOC.

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

$$\begin{aligned}
 V_{cel} &= V_{cel}(SOC) - V_{per} \\
 &= V_{cel}(SOC) - R_{int} \cdot I_{cel}
 \end{aligned}
 \tag{II.42}$$

avec:

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

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

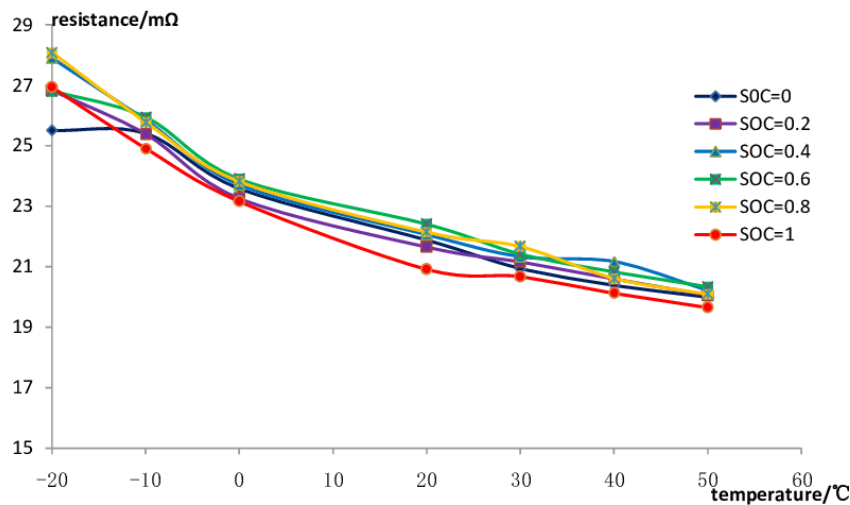


Figure (II.29): La résistance interne (DCR) d’une cellule (Li-ion) en fonction du SOC et la T° .

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

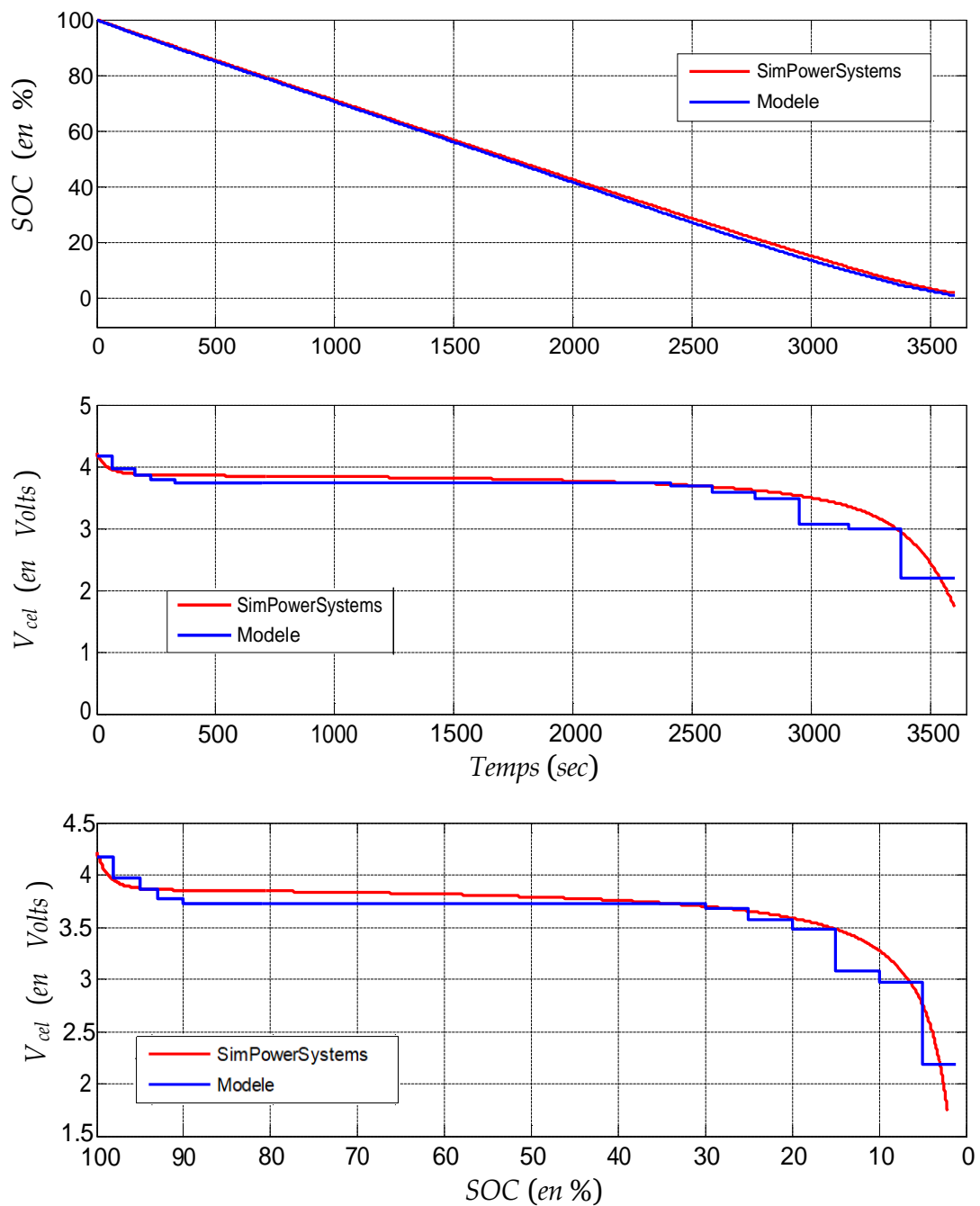


Figure (II.30): Simulation d'une décharge d'une cellule Li-ion

Dans cette figure, nous avons tracé les variables à partir du modèle, donné précédemment, mais nous avons préféré de représenter aussi un modèle d'une cellule Lithium-ion trouvé dans le block Sim-Power-Systems propre, juste pour comparaison, en utilisant le Logiciel MATLAB Simulink. Et comme nous l'avons dit précédemment, il est nécessaire de modéliser la décharge de la batterie du point de vue quantité d'énergie et non uniquement du point de vue variation de tension à ses bornes, si nous souhaitons ensuite faire une étude d'autonomie.

II.2.5.3.3. De la cellule à la batterie (un pack) :

Nous souhaitons dans la suite étudier et modéliser la configuration géométrique de la batterie (Figure II.29), c'est-à-dire l'agencement des cellules au sein du pack. Disposer d'un modèle de brique élémentaire (la cellule) nous permettra de construire différents packs et d'observer l'impact du nombre de branches et de cellules par branche sur la tension et le courant de sortie de la batterie (la puissance) et en conséquence l'autonomie et les performances de la batterie et du véhicule. L'hypothèse d'équilibrage des cellules est importante, car cela signifie que chaque cellule présente les mêmes caractéristiques (même courbe de décharge). Le pack ne présente pas de dispersion et toutes les cellules ont vieilli de la même façon. L'état de charge (SOC) d'une cellule coïncide alors avec l'état de charge du pack. Le modèle de pack se construit ainsi aisément à partir du modèle de cellule (Figure II.31) :

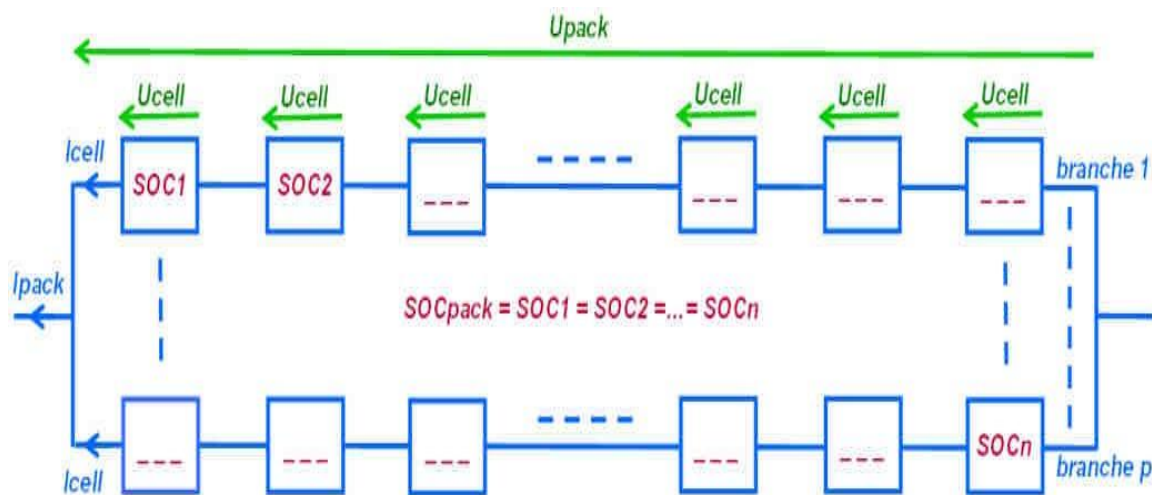


Figure (II.31): La tension d'une cellule au pack batterie

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

$$I_{pac} = \sum_{i=1}^p I_{cel} = p \cdot I_{cel} \tag{II.43}$$

$$V_{pac} = \sum_{i=1}^m V_{cel} = m \cdot V_{cel} \tag{II.44}$$

$$SOC_{pack} = SOC_{1\dots n} \tag{II.45}$$

avec :

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

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

p : nombre de branches

m : nombre de cellules par branche

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

Si nous supposons que nous avons une batterie avec $m = 96$ cellules et $p = 32$ branches, il sera possible de tracer l'évolution de V_{bat} et I_{bat} d'une batterie en situation de décharge et en fonction de l'état de charge $SOC(t)$. Une charge résistive de $R = 3\Omega$ est utilisé pour garantir la décharge de la batterie.

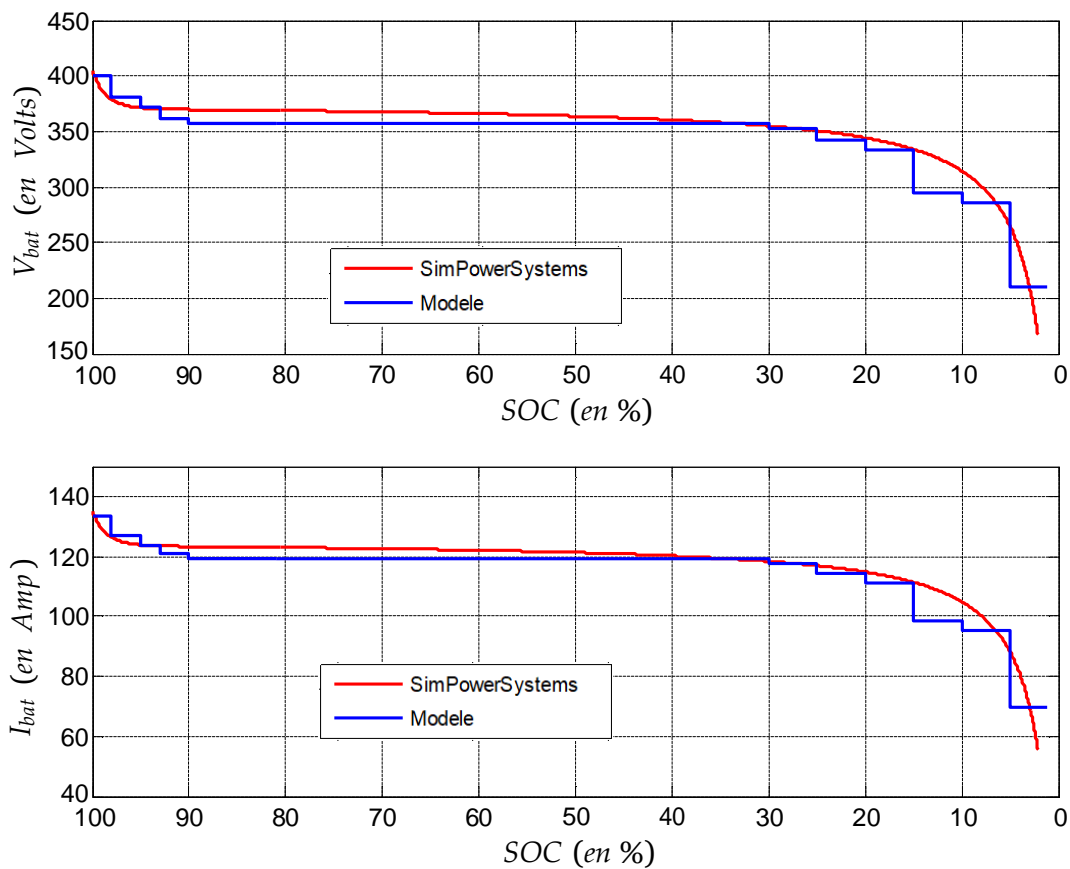


Figure (II.32): Tension et courant en situation de décharge d'une batterie Lithium-ion

II. 3. Modèle de la chaîne de traction du véhicule électrique (tout le système) :

Jusqu'à présent, nous avons étudié la modélisation des éléments de la chaîne de traction séparément, il est temps de les regrouper pour revenir à l'étude de la chaîne du véhicule électrique comme un seul système. Mais avant cela et afin de clore ce deuxième chapitre consacré à la modélisation, nous reproduisons le schéma du système complet présenté à la Figure II.1 en intégrant les modèles des différents organes, mais aussi, le modèle thermique et celui des accessoires fonctionnant en basse tension parce que on ne peut pas les exclure des schémas descriptifs détaillés. A noter que dans le cadre de ce mémoire, on ne va pas étudier le comportement thermique qui influe sur beaucoup de système à savoir : la machine électrique, la batterie, l'onduleur...etc. De plus, le réseau d'alimentation des accessoires fonctionnant en basse tension et les convertisseurs DC/DC ne seront pas étudiés, malgré l'importance de ces derniers.

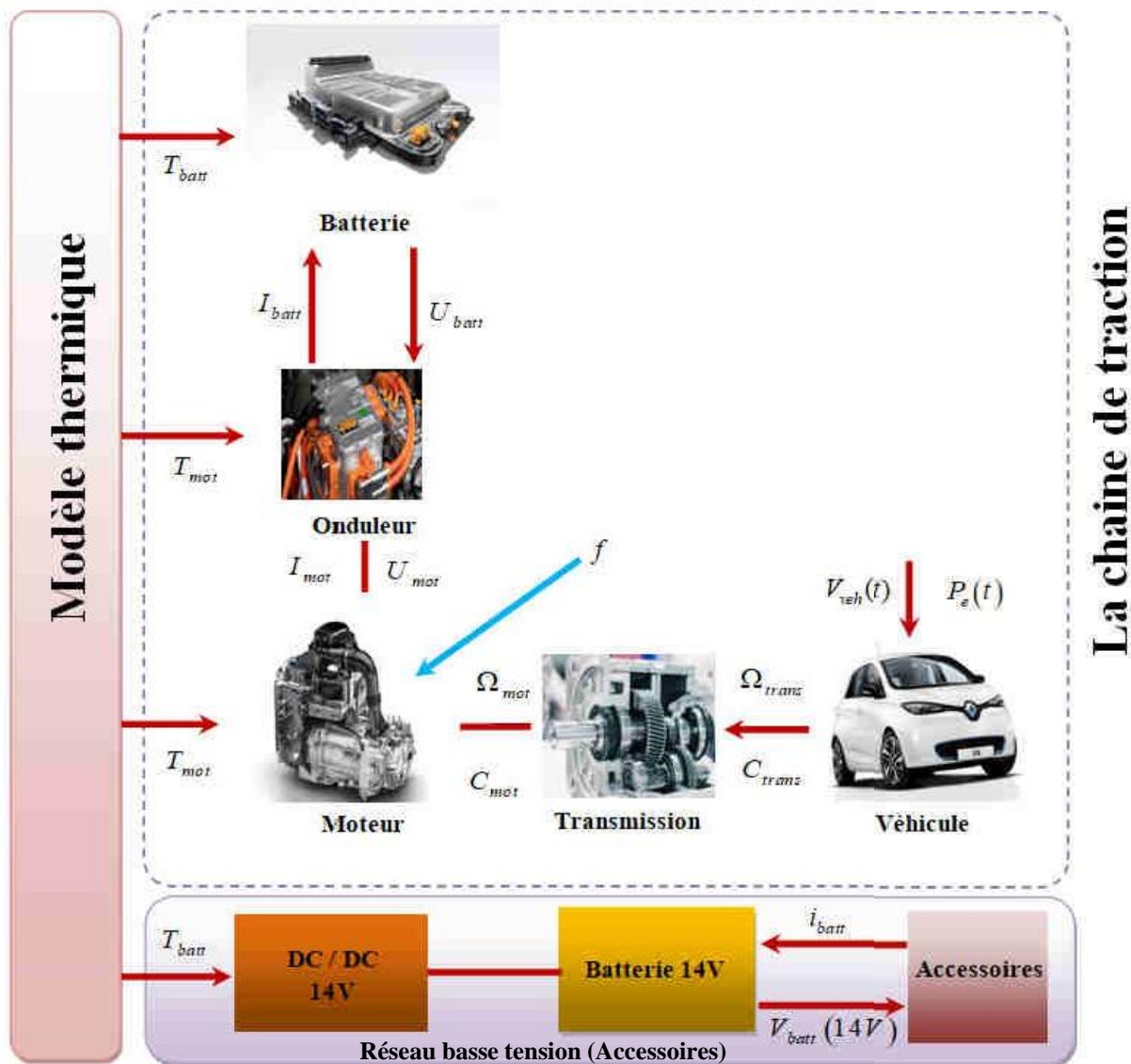


Figure (II.33): Schéma globale du système de puissance d'un véhicule électrique

La chaîne de traction d'un véhicule électrique est constituée de beaucoup d'éléments comme le montre la figure (II.33) qui représente la structure globale de la chaîne, comme nous avons vu dans les deux chapitres déjà réalisés, elle est constituée principalement de :

- **Modèle de véhicule :** on a fait une étude physique, on a étudié toutes les forces qui affectent la carrosserie du véhicule à l'intérieur et l'extérieur en utilisant beaucoup de paramètres spécifiques à chaque force qui dépend aussi de la trajectoire du véhicule.
- **Transmission :** on a étudié ce système responsable du transfert de l'énergie de rotation du moteur jusqu'aux pneus de véhicules à travers le réducteur constitué d'arbres primaire et secondaire et on a aussi étudié le calcul des rapports de transmissions afin de calculer la vitesse Ω_{mot} et le couple C_{mot} nécessaires produits par le moteur.
- **Machine électrique:** Dans notre étude nous avons choisi une machine asynchrone, mais en réalité ce n'est pas le seul type utilisé, dans chaque usine de fabrication les ingénieurs ont leurs raisons technologiques pour le choix des éléments du véhicule. Dans notre cas nous avons fait une étude électromagnétique (exprimée les courants et les flux qui fournissent par la MAS), et aussi une étude mécanique pour exprimer la vitesse et le couple du moteur.
- **Onduleur :** il est utilisé pour convertir les signaux continus générés par la batterie en des signaux alternatifs pour alimenter la MAS. Il est composé des transistors IGBT ou bien des Thyristors GTO.
- **Batterie :** c'est la source qui génère le signal continu à l'onduleur (tension $V_{batt} = 400V$) elle est composée de cellules de lithium-ion associées à travers une structure bien particulière définie pour fixer la tension et le courant de sortie. (des cellules liées en séries et autres en parallèles, dans des branches et des packs).
- **Les deux convertisseurs DC/DC** (de haute tension pour la chaîne de traction et de basse tension pour les accessoires) pour bien adapter les signaux continus et donc faciliter l'utilisation.
- **Modèle thermique :** dans la chaîne de traction, on a trouvé que nous avons quatre éléments qui sont dépendants du modèle thermique, la machine électrique (MAS), les batteries soit la batterie principale (400V) ou bien la batterie réservée aux accessoires (14V), l'onduleur et les deux convertisseurs DC/DC de haute tension et de basse tension.
- **Le bloc de commande** pour la variation de la vitesse de rotation de la machine et du véhicule.

La structure globale donnée par la figure (II.33) peut être simplifiée dans le schéma suivant :

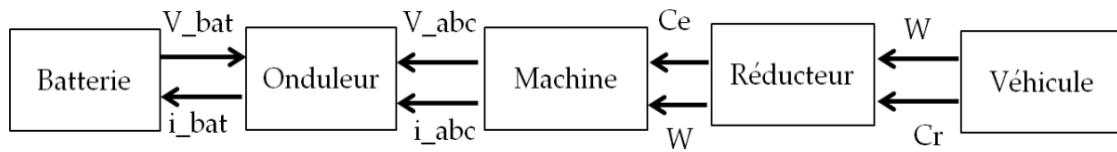


Figure (II.34) : Schéma simplifié de la chaîne de traction.

Comme le montre cette figure et comme nous avons fait dans ce chapitre, on a juste modélisé les éléments représentés et existants dans tous les véhicules électriques.

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait une étude structurelle et modélisation de la chaîne de traction, nous avons modélisé la chaîne élément par élément, {à savoir le modèle de véhicule, la transmission, le moteur électrique (MAS), l'onduleur, et aussi la batterie (400V)}. et nous avons constaté qu'un véhicule électrique est un système à modèle embarqué complexe, le modèle a plusieurs comportements : électrique, magnétique, mécanique, chimique (batterie), aérodynamique et aussi thermique ...etc. L'objectif est de connaître le fonctionnement de chaque élément important dans la constitution et le fonctionnement du véhicule électrique.

Mais, il y a d'autres éléments qui n'ont pas été modélisés dans ce chapitre tels que : La batterie d'accessoires (batterie 14V), le bloc de commande de la machine électrique, le modèle du comportement thermique (le comportement thermique de l'onduleur, de la machine MAS et des deux batteries), et aussi les deux convertisseurs DC/DC soit de haute tension (élément important dans la chaîne) ou de basse tension (pour l'alimentation des différents accessoires tels que l'éclairage, radio, tableau de bord...etc). Durant la modélisation de la chaîne de traction on a remarqué que les grandeurs des différents éléments sont tous liés et complémentaire entre eux (par exemple, lorsque nous varions les tensions de la machine asynchrone (MAS), la géométrie du véhicule ou le couple résistant, toutes les grandeurs seront variables).

Afin de clôturer ce deuxième chapitre consacré à la modélisation, nous pouvons dire que tous les modèles précédemment décrits sont compatibles du point de vue entrées-sorties et dans le prochain chapitre on va faire une association de tous ces éléments pour former un seul système.

CHAPITRE III

Association et simulation de la chaîne
de traction

III.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de décrire la connexion des modèles des composants pour obtenir le modèle du système de traction. Ce dernier sera testé dans différentes conditions afin d'établir l'importance de l'intégration de certains facteurs dans la modélisation. Nous relient alors les éléments pour compléter la chaîne de traction, mais nous n'avons choisi que les cinq éléments où nous les avons déjà modélisés dans le chapitre précédent, où, nous avons mis en place un modèle pour chaque élément du système de traction. Cela va nous permettre de simuler toute la chaîne de traction dont les paramètres des différents organes qui sont donnés dans les annexes 1...5. Les objectifs de notre problème est de vérifier la validité du modèle établie, mais également, de voir les performances du véhicule, c'est-à-dire, l'autonomie sur un cycle de roulage. Le challenge de ce chapitre est d'exploiter les modèles des différents éléments du système (de 2eme chapitre). Bien que notre modèle analytique soit assez rapide, la simulation d'un cycle ainsi que le choix du contrôle pour la machine, vont trop allonger les temps de calcul. C'est dans l'optique de réduction de ce temps que nous avons mis en place ce que nous appelons une architecture optimisée. Dans ce chapitre, nous avons donc joué sur la structure du problème en comparant différentes possibilités sur le cycle.

III.2. Association des éléments de la chaîne de traction :

L'assemblage des modèles est spécifique à notre objectif de conception par optimisation pour conserver les contraintes principales tout en réduisant le temps de calcul. Nous résumons les principales hypothèses effectuées, [3], [23] :

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

De plus, et à partir de la modélisation de la chaîne de traction que nous avons présenté dans le deuxième chapitre, on va construire un modèle globale de tout le système véhicule électrique, malgré que, nous avons retiré de notre travail l'étude de beaucoup de phénomènes et d'éléments. La figure III.1 récapitule les liaisons entre les modèles de la chaîne du véhicule à étudier, où la causalité n'est respectée que pour la tension batterie, tel que nous l'avons établi à la Figure II.33.

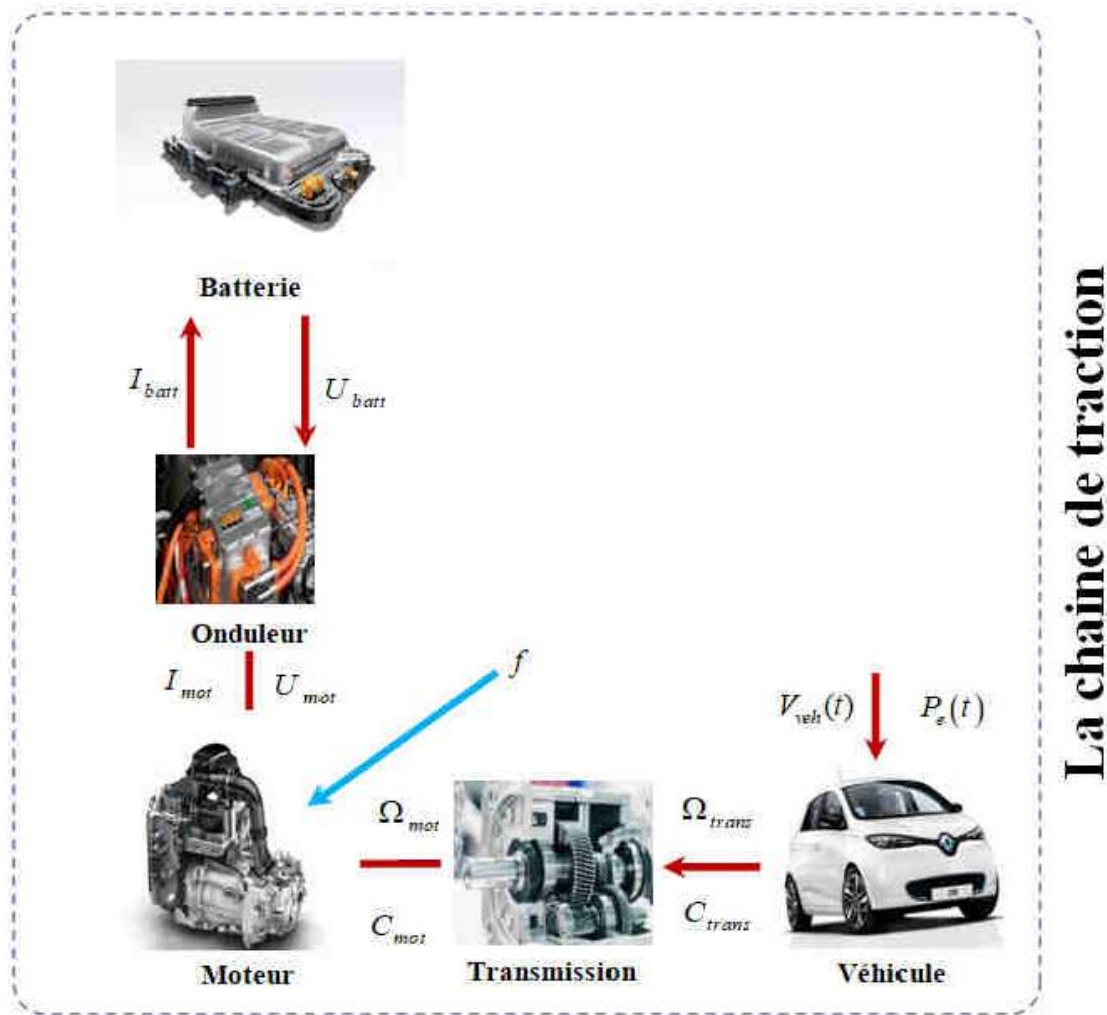


Figure (III.1): Chaîne de traction d'un véhicule électrique simplifié.

Dans une chaîne de traction d'un véhicule électrique (tels que la chaîne représentée par la figure précédente) et pour réussir d'assurer que le véhicule roule à la vitesse souhaitée, il faut confirmer et assuré que l'association des différents éléments doit être correcte et tous les éléments doivent être compatibles entre eux en termes de puissance générées. Attention, il s'agit de puissances nécessaires pour rouler à la vitesse souhaitée. A ne pas confondre avec les puissances disponibles au niveau de chaque organe, [23], [24]. Nous utilisons ensuite l'information sur la quantité d'énergie disponible dans la batterie et la corrélons à la puissance demandée à la sortie de la batterie. A titre d'exemple, nous avons tracé sur la figure II.2 des courbes de puissances nécessaires en fonction de la vitesse du véhicule (Les paramètres utilisés correspondent à un petit véhicule Renault existant (Twizy) à titre d'exemple, [4]).

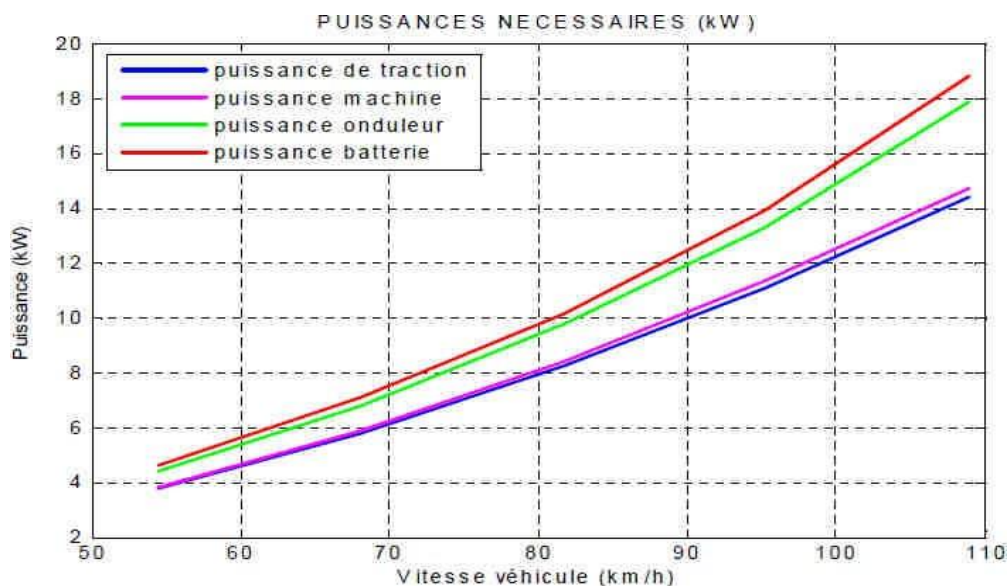


Figure (III.2): Puissances nécessaires au niveau des organes de la chaîne de traction en fonction de vitesse

Ces courbes nous permettent d'en déduire le rendement associé à chaque organe et ainsi d'identifier à quel niveau doivent se porter les efforts d'amélioration du rendement, [4]. Les courbes présentées sur la Figure III.3 nous indiquent ici que c'est au niveau de la machine que l'optimisation doit être menée en priorité.

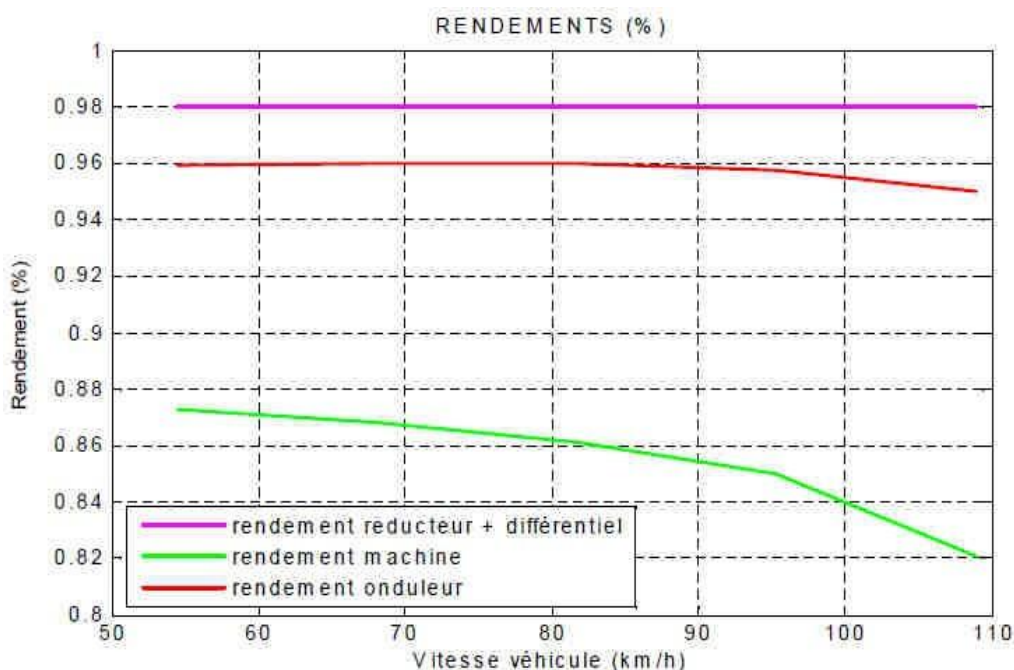


Figure (III.3) : Rendement des organes de la chaîne de traction à vitesse constante

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

III.3. Autonomie de la chaîne de traction du véhicule électrique:

L'autonomie est un facteur dimensionnant dans le cas du véhicule électrique. En utilisant une batterie de capacité plus grande, on peut s'attendre à avoir une autonomie plus importante. Il faut néanmoins prendre en compte le fait que la masse totale du véhicule se voit également augmenter, ce qui augmente la consommation globale du véhicule. On peut redonner les équations (II.8), (II.9), (II. 3) (II.5) et (II.6) du chapitre précédent, et à partir desquels on peut constater que la puissance demandée par le véhicule (absorbé de la batterie) augmente avec l'augmentation de la vitesse et de la masse du véhicule.

$$\Omega_{trans}(t) = \frac{1}{R_{roue}} V_{veh_moyen} \quad (III.1)$$

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

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

$$F_{pneu} = CRR(V_{veh}) \cdot M_{veh} \cdot g \quad (III.4)$$

$$F_{accel} = \left(M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \gamma = \left(M_{veh} + \frac{J_{tot}}{(R_{roue})^2} \right) \cdot \dot{v}_{veh} \quad (III.5)$$

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

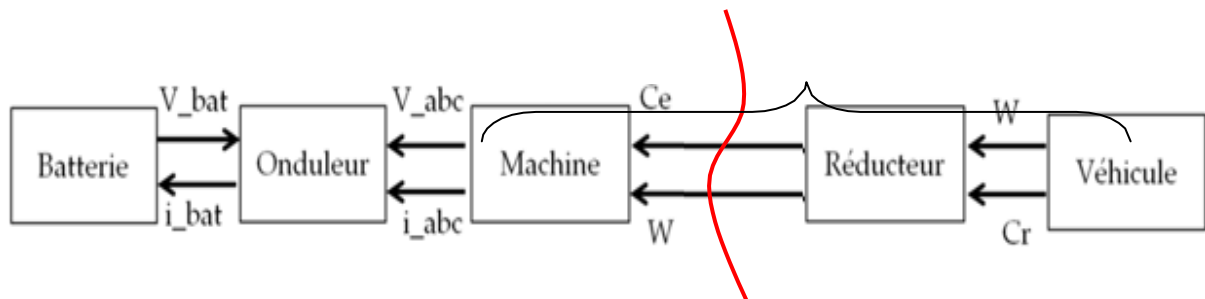
Dans un véhicule électrique et malgré que l'autonomie du véhicule décroît avec plusieurs facteurs comme nous avons déjà parlé, toute la plage de l'état de charge de la batterie est exploitée pour assurer un maximum d'autonomie. Le niveau maximal peut atteindre le 100%, cas d'une recharge complète de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

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

III.4. Simulation du fonctionnement de la chaîne de traction :

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

Partie de simulation 1



Partie de simulation 2

Figure (III.4): Chaîne de traction simplifiée

La simulation sera alors effectuée en deux étapes ; dans la première étape, et pour certaines raisons, on va simuler la première partie représentée sur la figure, et par la suite on va simuler tout le système de traction du véhicule.

III.4.1. Simulation de la première partie de la chaîne de traction :

Cette première partie de simulation concerne uniquement les éléments électriques de la chaîne, où la dynamique de variation de ces grandeurs est rapide surtout l'onduleur et la machine, cela nous oblige de faire, dans un premier lieu, représenter les résultats sur un petit intervalle de temps (5 secondes) afin de voir les régimes transitoires surtout pour la machine (pour l'onduleur les figures données dans le chapitre précédent sont suffisantes), la figure suivante représente les éléments associés de notre première partie de simulation de chaîne :

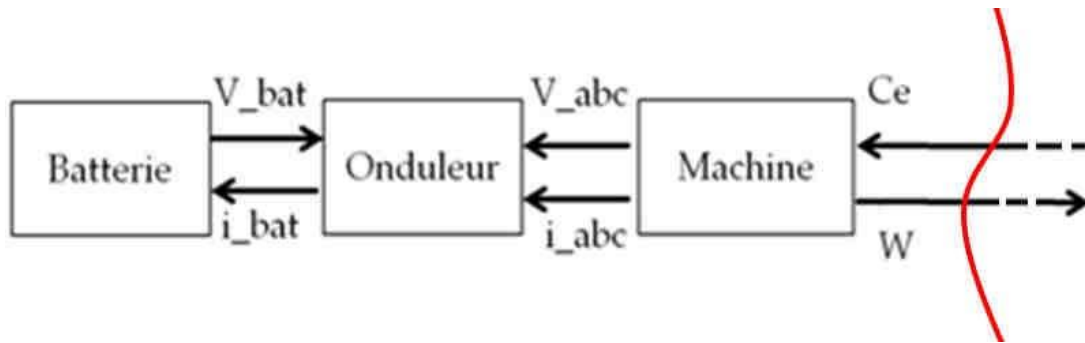


Figure (III.5): Première partie de la chaîne de traction simplifiée

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (II.6) et (II. 7), ils montrent que pendant le régime transitoire, la vitesse augmente pour atteindre une valeur proche de la vitesse de synchronisme (314 rad/s). Les courants et le couple électromagnétique présente des fortes oscillations aux débuts, mais après, ils commencent à suivre des variations en raison de l'augmentation progressive du couple résistant jusqu'à les instants 2 seconde, et ensuite, 4 secondes, où il a stabilisé sur deux valeur successivement. Les variations de ces deux grandeurs sont fortement liées aux variations du couple résistant.

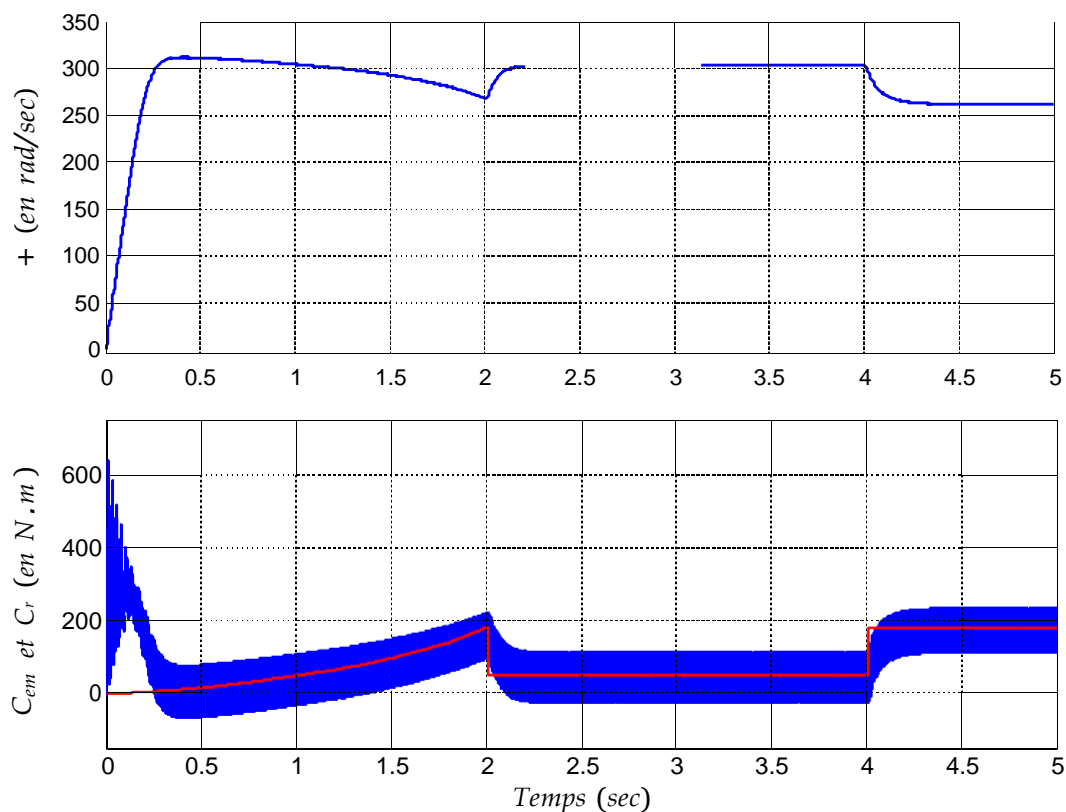
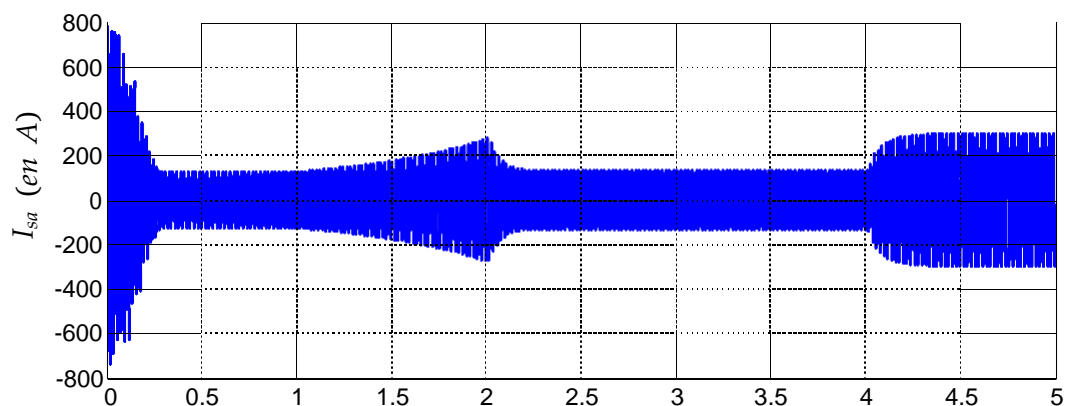


Figure (III.6): Evolution des grandeurs mécanique de la MAS

A partir de la figure (figure III.7), on peut remarquer que les flux rotoriques et statoriques sont sinusoïdales d'amplitudes variables, même chose pour le courant statorique d'une phase de la machine, tant que le couple est variable. A partir de l'instant 2 secondes et ensuite 4 secondes, où nous avons inséré deux valeurs du couple de charge continues mais constantes, on a remarqué des variations de la vitesse, du couple électromagnétique, et en conséquence de l'amplitude du courant et des flux (figure III.7), le couple électromagnétique rejoint toujours la valeur du couple de charge. Les résultats de simulation exhibent logiques et satisfaisants et le modèle utilisé montre très corrects.



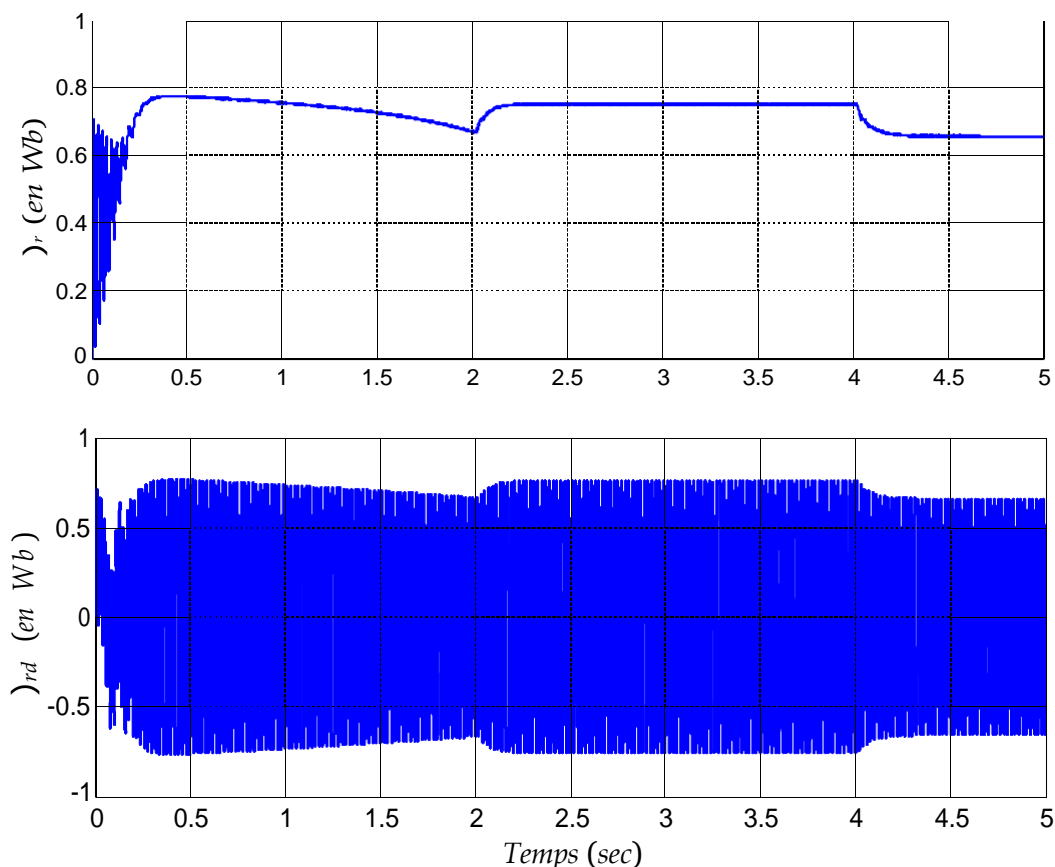


Figure (III.7): Grandeurs électromagnétiques de la machine

Le temps de simulation de cette première partie est très court, alors, la représentation des résultats des variations des grandeurs de la batterie devient inutile, parce que les variations de l'état de charge de la batterie SOC et la tension à la sortie de la batterie V_{bat} sont très petites.

III.4.2. Simulation de la deuxième partie de la chaîne de traction :

Cette partie de simulation décrit l'assemblage de tous les éléments et modèles de tout le système de traction, ici, les conditions de roulage (excepté la vitesse du véhicule V_{veh}) et tous les éléments intervenant dans la modélisation de véhicule doivent être respectés. La figure suivante montre le schéma de principe simplifié selon lequel cette deuxième partie de simulation sera faite.

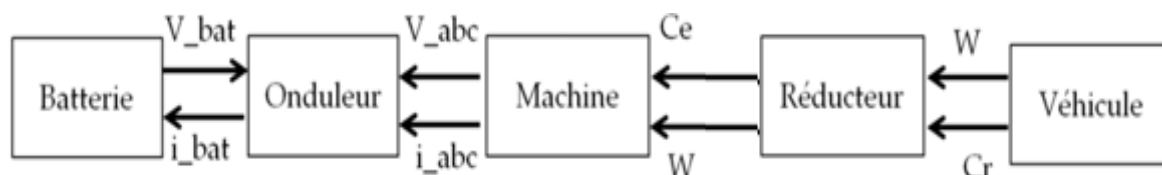


Figure (III.8): Chaîne de traction simplifiée (deuxième partie de simulation)

Il est important de dire que la simulation est faite selon les conditions de roulage donnés au chapitre précédent (figure II.4) et que les paramètres du véhicule, de la batterie, de la machine, de l'onduleur et du système de transmission sont tous donnés sur les annexes 1, 2, 3, 4 et 6.

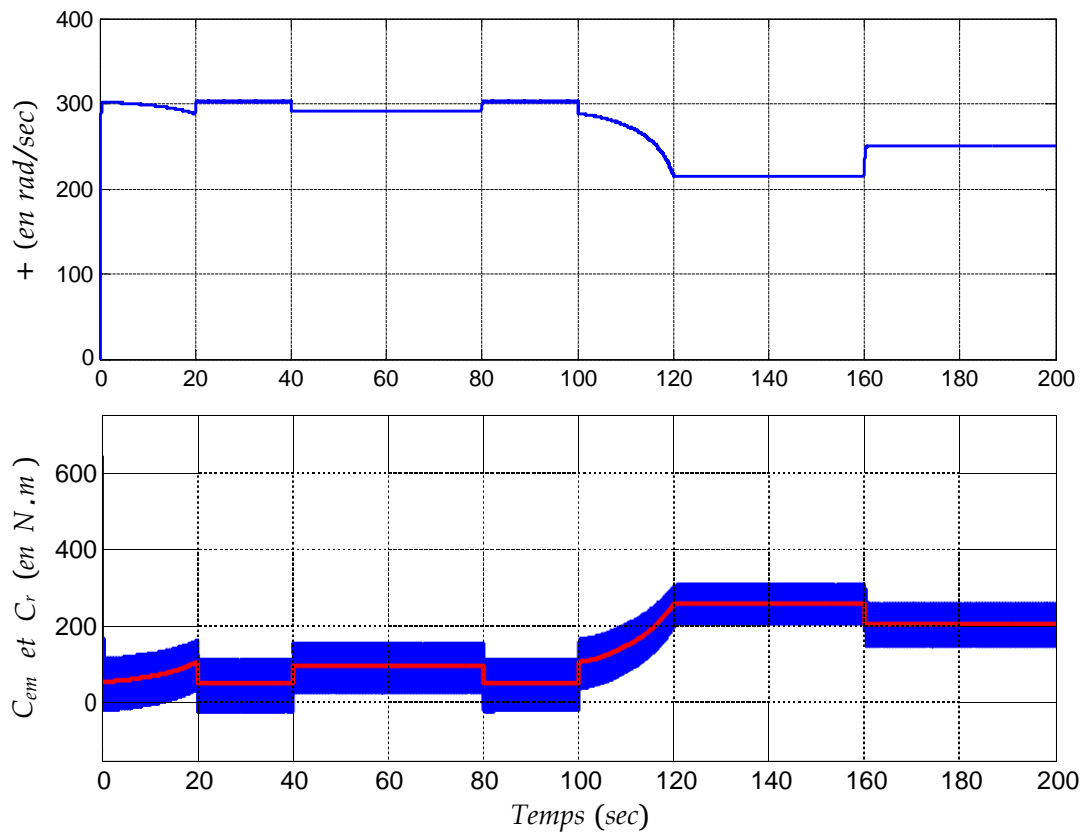
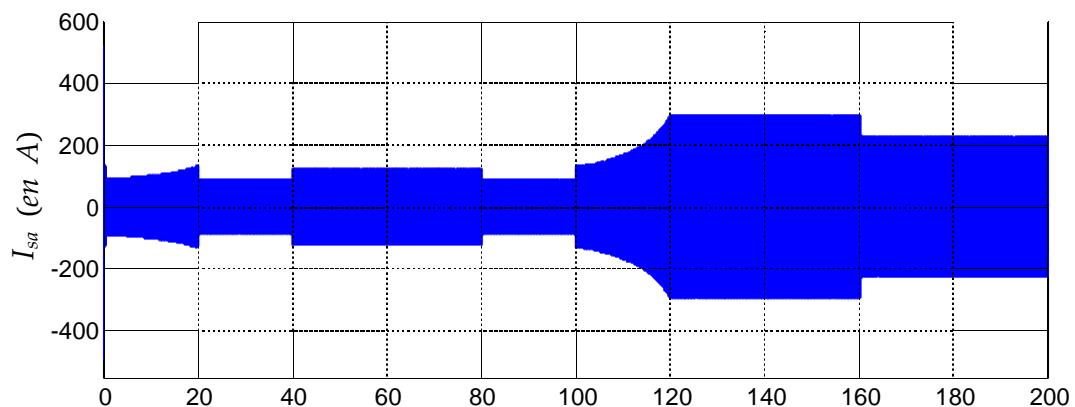


Figure (III.9): Evolution des grandeurs mécanique de la MAS

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



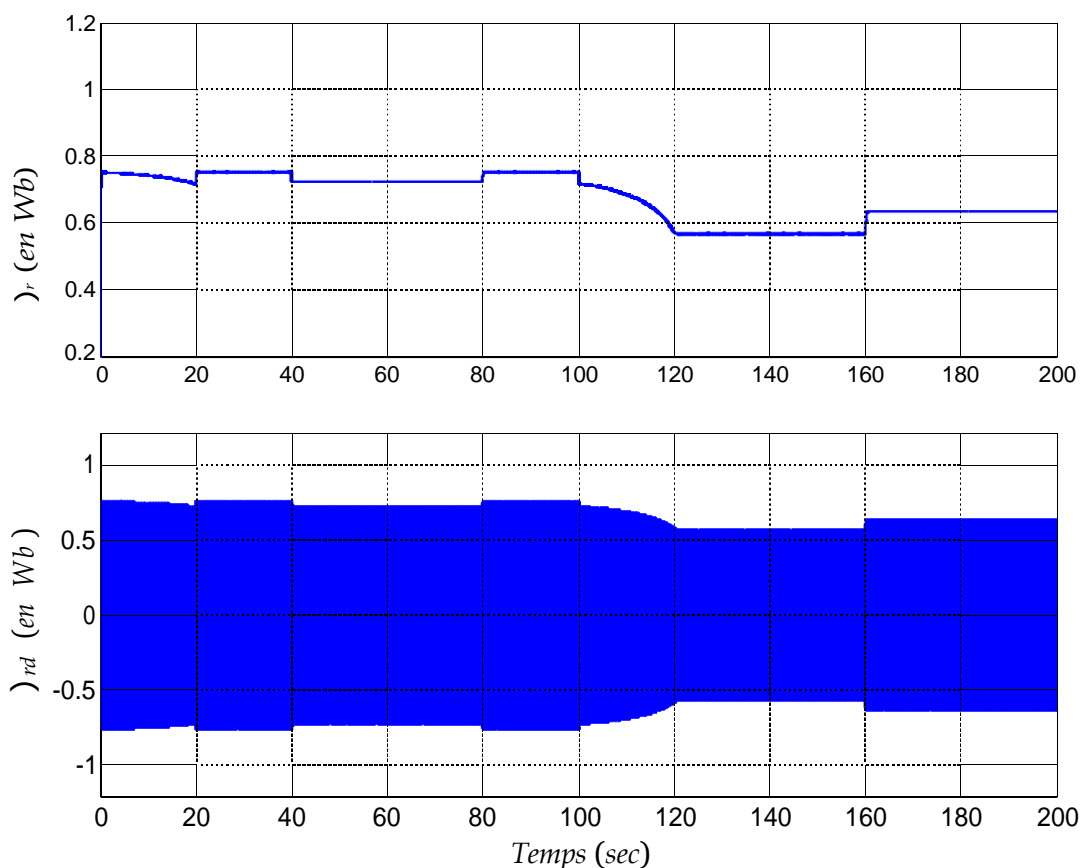
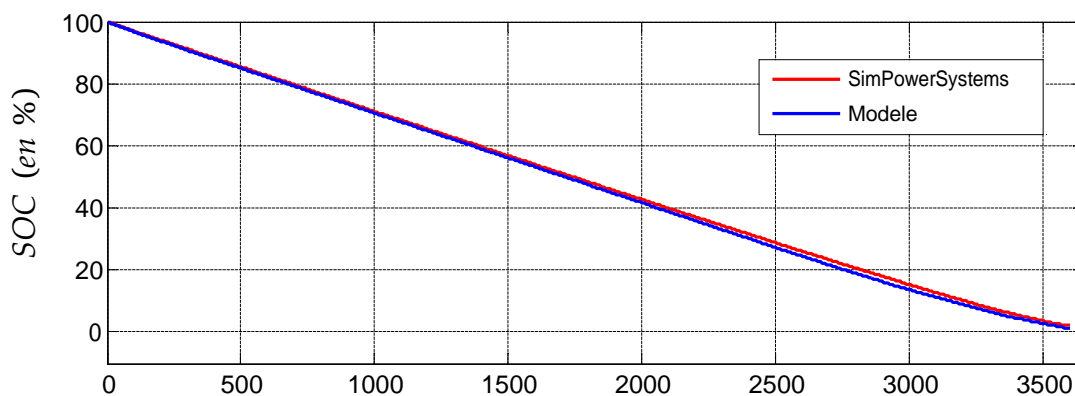


Figure (III.10): Evolution des grandeurs électromagnétiques de la machine

Le temps de simulation de cette deuxième partie (200 secondes) est suffisant pour la représentation des résultats des variations des grandeurs de la batterie, malgré que les variations de l'état de charge de la batterie SOC et la tension à la sortie de la batterie V_{bat} sont petites. Nous avons préféré de donner la figure (III.11) qui présente ces deux grandeurs, où nous pouvons remarquer que l'état de la batterie SOC reste excellent et que la tension de sortie (400 Volts) demandée à la batterie est largement assurée pour un temps de 200 secondes. Les paramètres de la batterie sont donnés sur l'annexe 6, où la tension de sortie nominale est 400 Volts, le nombre de cellule est 192, avec $m = 96$ cellules en série et $p = 32$ branches.



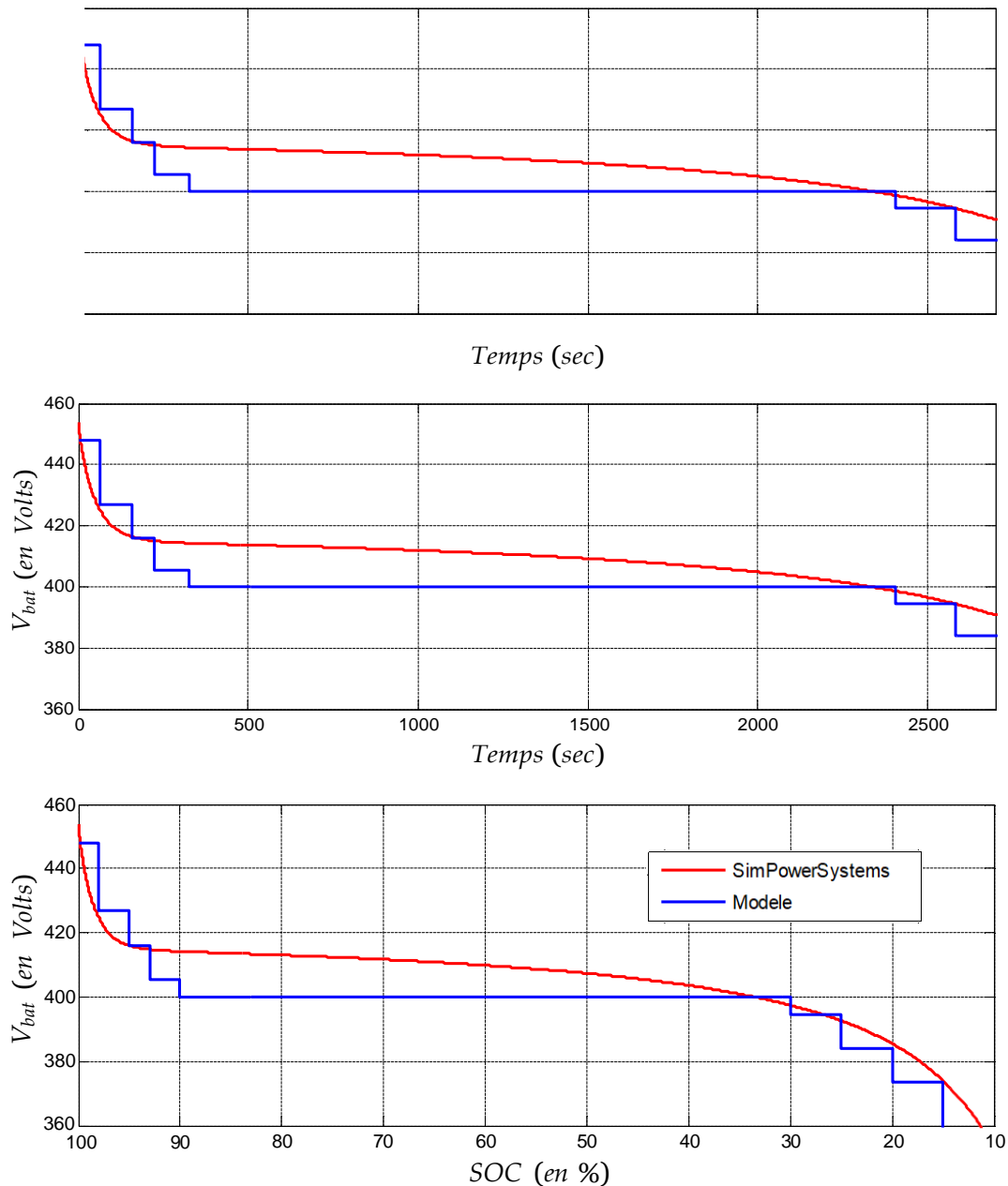


Figure (III.11): Simulation de la décharge d'une batterie Li-ion

Remarque importante : Dans cette partie de simulation, l'enchaînement des modèles tels représentés sur la figure (III.8) ne respecte pas la causalité : nous cherchons à savoir si la chaîne de traction considérée est capable de respecter les performances demandées sans calculer les performances réellement atteintes le cas échéant. L'objectif ici n'est pas d'étudier la commande dynamique du système véhicule. Malgré cela, on peut dire que les résultats montrent satisfaisants. Dans ce qui suit, nous allons considérer le cas réel, où le véhicule est un système lié directement au conducteur, ils forment ensemble un système Véhicule-Conducteur faisant ensembles une partie importante de la boucle de **pilotage de la chaîne de traction**.

III.4.3. Pilotage de la chaîne de traction:

Dans le reste de ce travail on va essayer de respecter la causalité dans l'enchaînement des modèles de tous les éléments et les organes de la chaîne de traction, de ce fait, la simulation d'un cycle de roulage complet en terme d'opération (y compris le pilotage) peut rapidement engendrer des temps de plusieurs dizaines de secondes si en intégrant la commande de la vitesse de la machine et par conséquent du véhicule, [3], [4]. Par ailleurs, l'évolution possible des modèles à l'avenir vers plus de détails est également un risque de forte augmentation des temps de calcul. Dans ce contexte, des stratégies ont été développées pour mettre en place des architectures meilleures pour l'optimisation afin de limiter les calculs au juste nécessaire, [23], [24]. La figure (III.12) permettra de mettre en place une architecture globale pour commander la vitesse de la machine électrique (à travers l'onduleur) et par conséquent la vitesse du véhicule :

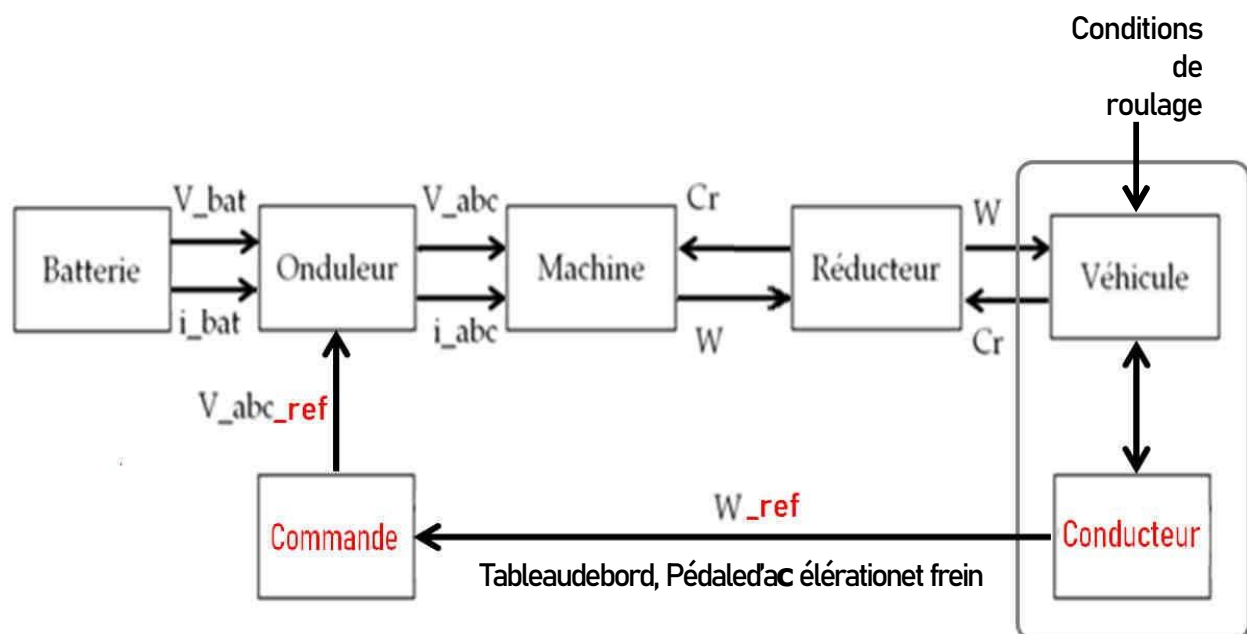


Figure (III.12): Architecture d'une chaîne de traction (avec commande et conducteur).

Dans la littérature, ils existent plusieurs techniques de commande de la machine. Dans notre travail, une commande classique sera utilisée pour piloter la machine asynchrone, c'est la Commande Scalaire, où le principe est de garder le flux constant, ce qui signifie de garder la quantité V/f constante sur toute la plage de fonctionnement (voir l'annexe 7 pour plus de détails), et dans notre travail, on ne va pas étudier les détails de cette loi de commande parce que on n'a pas assez de temps pour finaliser ce mémoire.

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

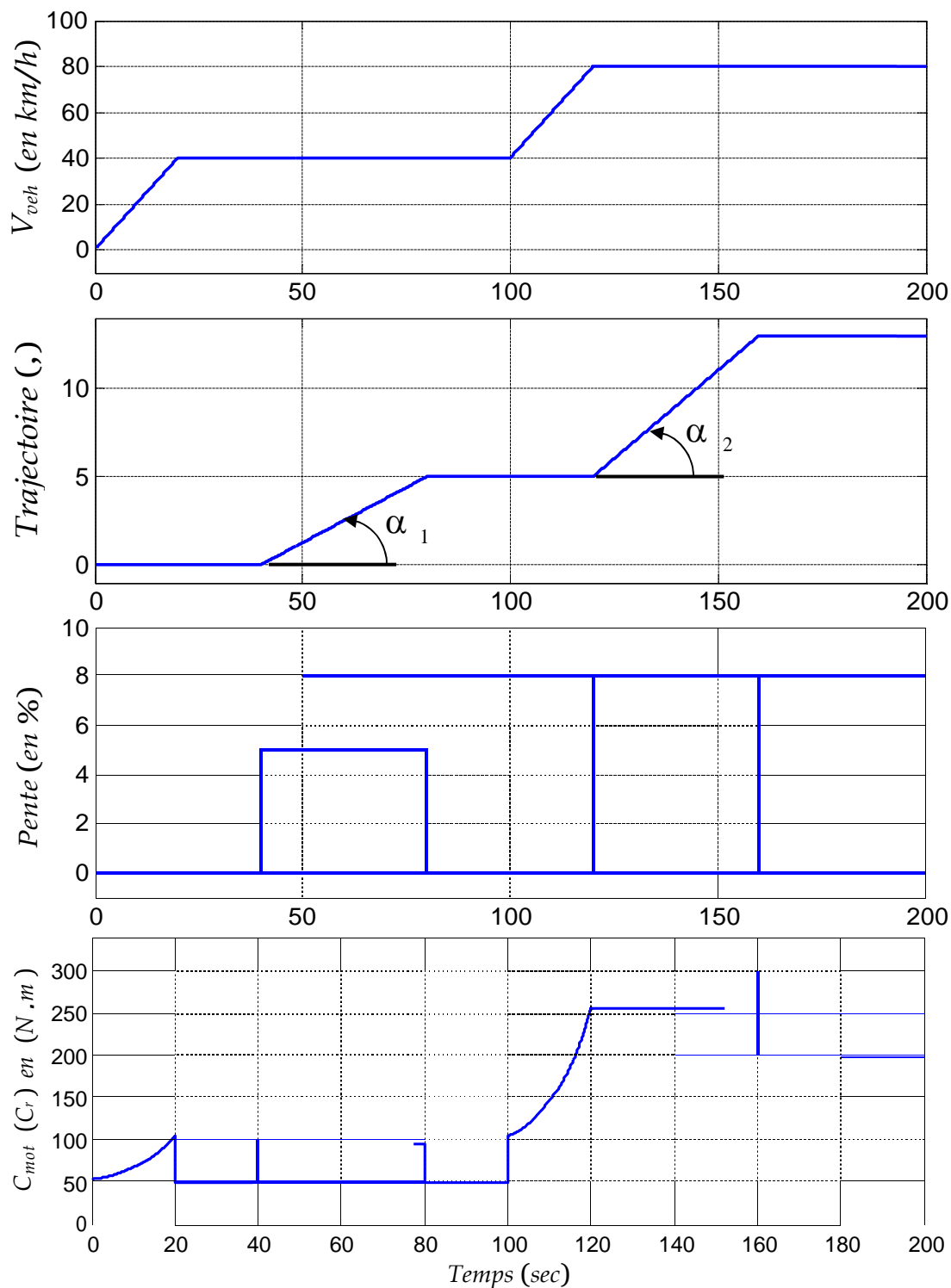


Figure (III.13) : Conditions de roulage appliquées (Exemple du deuxième chapitre)

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

- Grimper une pente donnée à vitesse faible ;
- Réaliser une accélération ;

- Grimper une pente donnée à une vitesse maximum;
- Maintenir une vitesse maximum.

Les résultats de simulation de la chaîne de traction selon les conditions de la figure (III.13) sont donnés les figures qui suit :

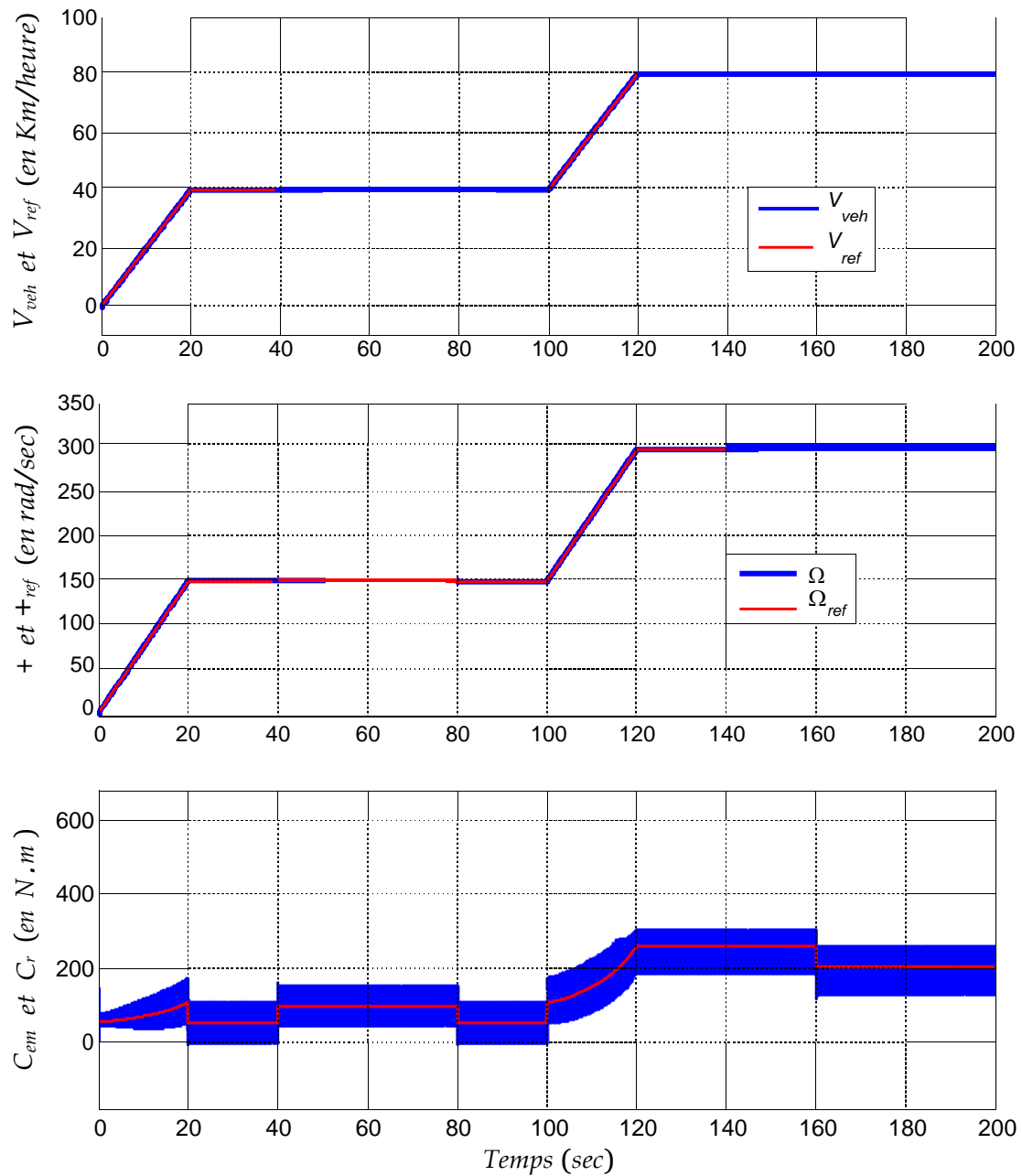


Figure (III.14): Evolution des grandeurs mécanique de la MAS

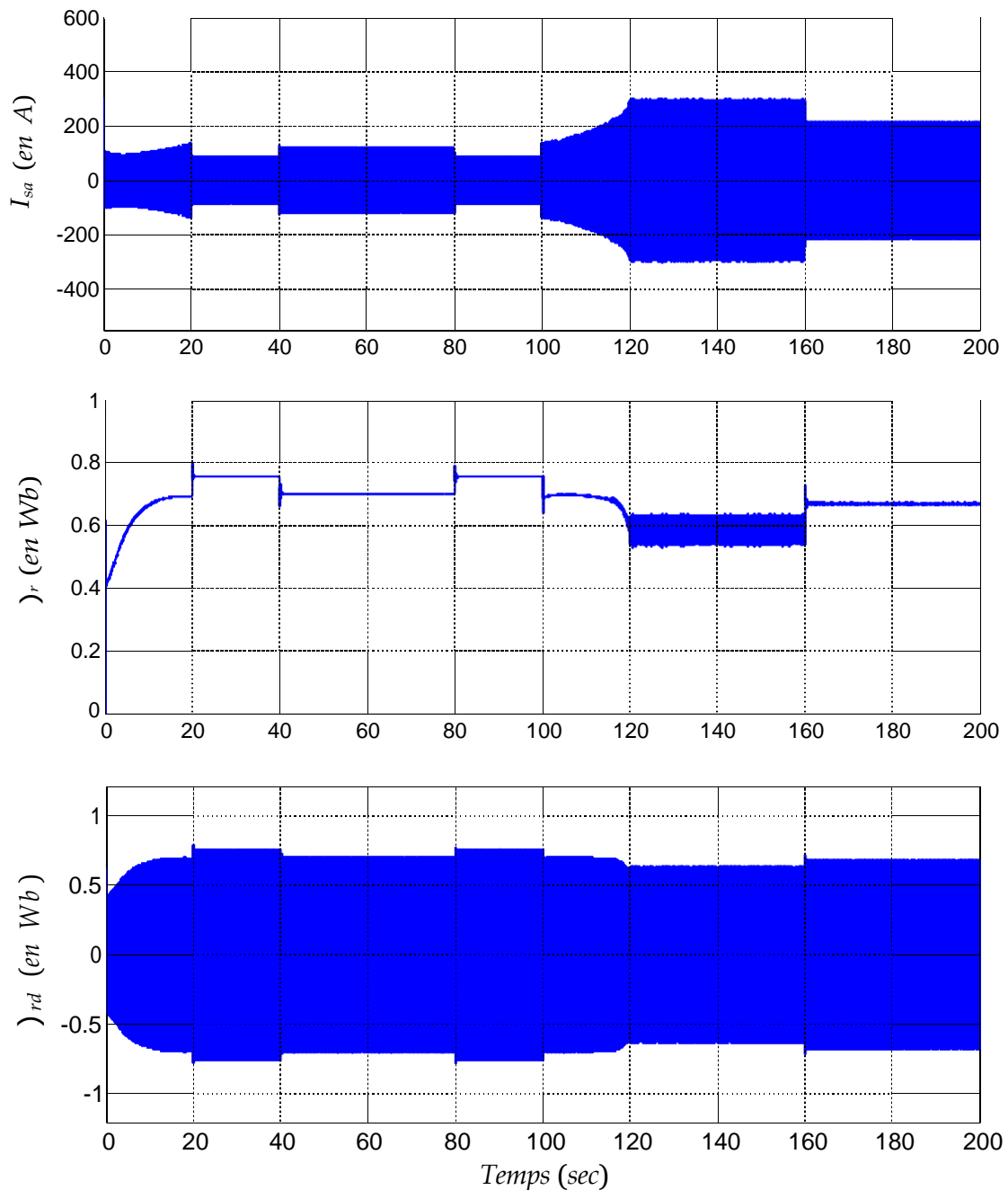


Figure (III.15): Evolution des grandeurs électromagnétiques de la machine

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

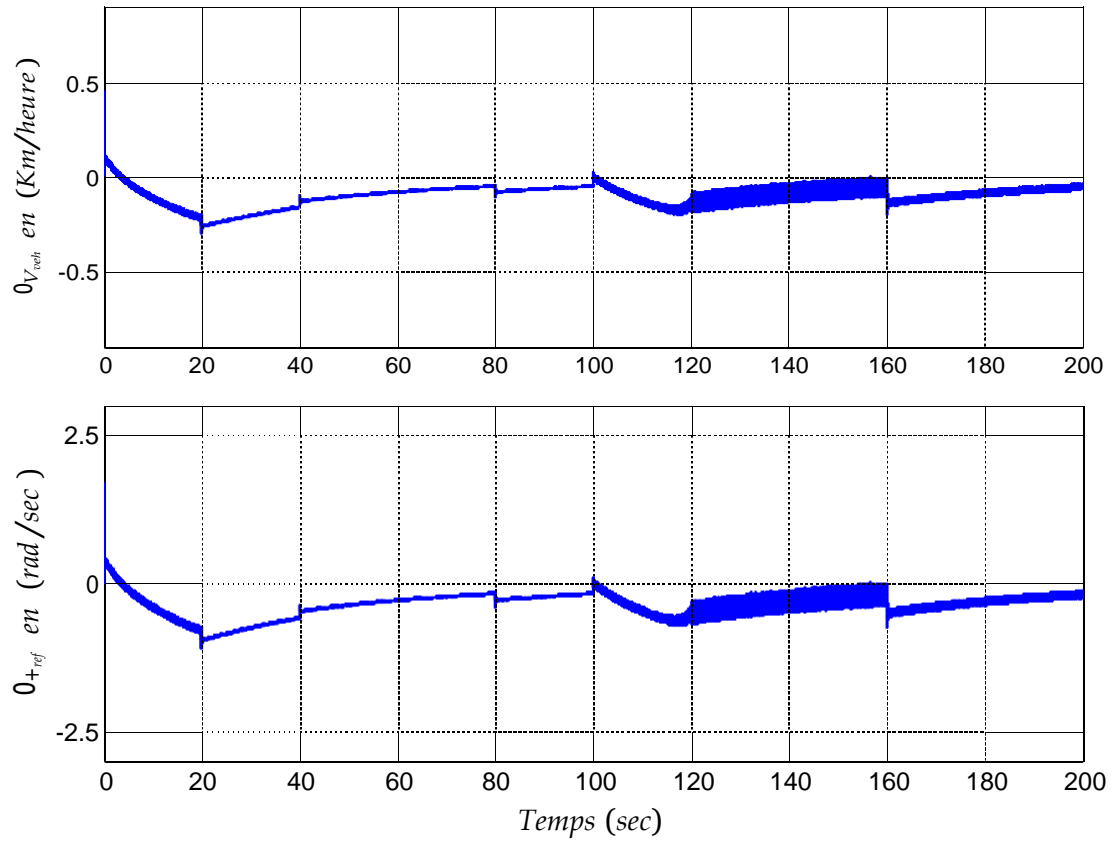


Figure (III.16): Erreurs de poursuites commises sur la vitesse de la machine et du véhicule.

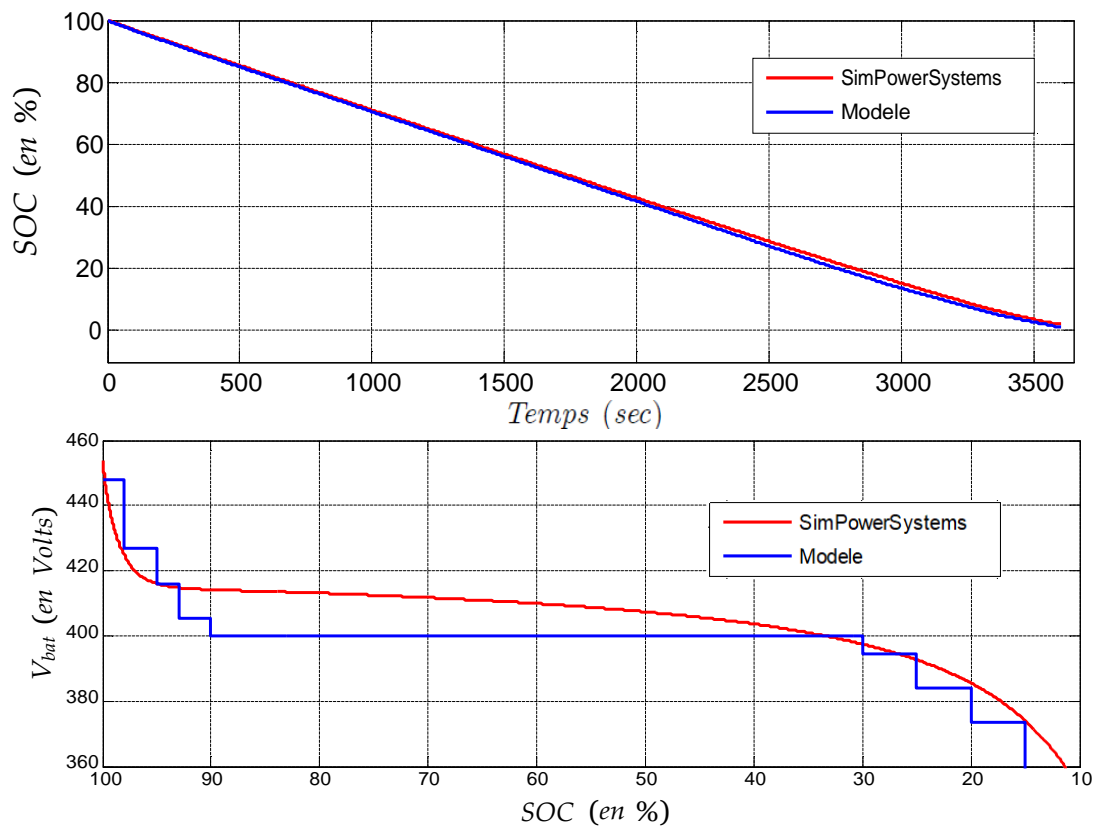


Figure (III.17): Simulation de la décharge de la batterie Li-ion

A partir de la figure (III.17), on peut remarquer qu'après 200 secondes, les variations de l'état de charge de la batterie SOC et la tension à la sortie de la batterie V_{bat} sont petites. Nous pouvons remarquer que l'état de la batterie SOC baisse légèrement en fonction du temps lors de la simulation d'un cycle de roulage et que la tension de sortie (400 Volts) demandée à la batterie est largement assurée pour un temps de 200 secondes. Les paramètres de la batterie sont les mêmes que précédemment (la tension de sortie nominale est 400 Volts, le nombre de cellule est 192, avec $m = 96$ cellules en série et $p = 32$ branches).

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

III.5. Conclusion :

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

Conclusion Générale

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

L'objectif principal de ce projet est axé sur l'étude structurelle, la modélisation et la commande d'une chaîne de traction pour véhicule électrique. A travers ce modeste travail nous avons présenté dans un premier temps, une étude de présentation des véhicules électriques ainsi que leurs évolutions à travers l'histoire, également nous nous penchons sur la constitution des organes de traction, un choix de configuration de propulsion du véhicule électrique est présenté et est justifié. en suite, nous avons présenté les modèles des différents éléments constituant la chaîne de traction des VEs, tels que le modèle mécanique longitudinal du véhicule, le modèle de la batterie, le modèle du système de transmission, le modèle du convertisseur statique et enfin le modèle de l'actionneur électrique utilisé. Aussi bien, un modèle d'association des différents éléments est proposé et est étudié en détailles. Une troisième partie a été réservée à l'association et à la simulation des éléments de la chaîne de traction, mais aussi, nous avons présenté l'importance de la commande de la chaîne qui ne sera pas effectué sans l'introduction d'une loi de commande et d'un conducteur. Nous avons utilisé une simple loi de commande, il s'agit d'une commande scalaire. Après avoir présenté plusieurs schémas d'associations, nous avons effectué plusieurs simulations pour montrer la validité des modèles étudiés et arriver à quelques discussions et conclusions. Les objectifs de notre problème est de vérifier la validité du modèle établie, mais également, de voir les performances du véhicule, c'est-à-dire, l'autonomie sur un cycle de roulage. Le challenge de ce chapitre est d'exploiter les modèles des différents éléments du système. Bien que notre modèle analytique soit assez rapide, la simulation d'un cycle ainsi que le choix du contrôle pour la machine, vont trop allonger les temps de calcul. C'est dans l'optique de réduction de ce temps que nous avons mis en place ce que nous appelons une architecture optimisée. Dans ce chapitre, nous avons donc joué sur la structure du problème en comparant différentes possibilités sur le cycle.

Conclusion Générale

Les résultats de ce travail étant convaincants, le projet est applicable sur les machines électriques dominantes dans le milieu industriel. Et c'est ainsi que nous avons vécu une expérience très pertinente et multidisciplinaire dans le domaine de l'électromécanique et l'électrotechnique (la commande, l'électronique de puissance, la mécanique, les machines électrique ... etc), cette vision globale qui nous a apporté cette expérience sera sans aucun doute un atout dans nos futures expériences professionnelles.

Comme perspectives, il est important de dire qu'ils restent beaucoup d'étude à faire pour compléter ce travail. Le plus important c'est de faire réintégrer les convertisseurs DC/DC que nous avons exclure de notre travail, malgré son importance dans les véhicules électriques, de plus, une étude sur les actionneurs électriques utilisés et les lois de commandes appliquées (parce que nous n'avons pas justifié notre choix de la commande scalaire, c'est juste pour simplifié et rien d'autres) dans les chaines de traction pour véhicules électriques est important. Une autre chose importante, c'est l'étude de modélisation approfondie de la batterie et de son autonomie qui reste dépendante de beaucoup de facteurs. Afin de clore ces perspective, nous devons revenir à la modélisation de, presque, tout les éléments, parce que nous avons ignoré l'effet thermique qui affect les machines électrique, les convertisseurs électrique, les batteries ... etc. Donc à notre modeste avis, ce n'est pas bon de l'ignorer.

Références Bibliographiques

- [1] Benoît SARRAZIN, “Optimisation d’une chaîne de traction pour véhicule électrique“, “Thèse de doctorat”, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 27 novembre 2012.
- [2] F. Khoucha, A. Khoudiri, M. Benbouzid, A. Kheloui, Commande DTC d’une propulsion moteur asynchrone / onduleur multi niveaux asymétrique pour un véhicule électrique, “*Européen Journal of Electrical Engineering*“, 14, 2-3 (2011) 237-254.
- [3] MARIF Ismail & ABDAT Hichem, « La commande en vitesse d’un véhicule électrique», “*Mémoire de master*“, 'Université de Tlemcen, 2019.
- [4] C. Espanet. Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée (Application au moteur-roue), “*Thèse de doctorat*”, Université de Franche-Comté, Janvier 1999.
- [5] G. Malloy, M. Lachapelle, *Essence,hybride* ou électrique :ce q’il faut savoir, Association Canadienne des Automobilistes.
- [6] L. Angot, La mobilité électrique dans les systèmes de transport et de mobilité urbains, constats et perspectives. Comment développer une nouvelle offre de mobilité durable par le biais de l’électromobilité dans la métropole toulousaine, Géographie. 2014.
- [7] Mr. MESKINE.S & Mr. REBHIM, « Etude et simulation des éléments de chargeurs intégrés pour véhicule électrique », 'Université de Mostaganem, 2019
- [8] S. Meziani , A.Bourenane, Contrôle par logique floue d’une chaine de traction d’un véhicule électrique basé sur une machine asynchrone à double alimentation, “*Mémoire de master*“, Université Abderahmane Mira Bejaia, 2013
- [9] C. Espanet. Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée- Application au moteur-roue, “*Thèse de doctorat*“, Université de Franche-Comté, Janvier 1999.
- [10] M. Ikkiss, R. El Ferrare, Voitures solaires électriques, “*Mémoire de Master*“, Faculté multy-disciplinaire de Ouarzazate, Mai 2013.
- [11] Nathalie Mayer article initial le 27/01/2016.
- [12] Adrian FLORESCU. « Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique», “*thèse de doctorat*“, université de Grenoble, France, 2012
- [13] Pierre Caillard. «Conception par optimisation d’une chaine de traction électrique et de

- son contrôle par modélisation multi-physique», “*thèse de doctorat*“, Ecole Centrale de Lille, 2015.
- [14] M. J. Hill, R. F. Kunz, R. W. Noack, L. N. Long, P. J. Morris, and R. F. Handschuh, “Application and Validation of Unstructured Overset CFD Technology for Rotorcraft Gearbox Windage Aerodynamics Simulation,” in *Annual Forum of the American Helicopter Society*, 2008.
- [15] Noëlle Janiaud, « Modélisation du système de puissance du véhicule électrique en régime transitoire en vue de l’optimisation de l’autonomie, des performances et des coûts associés », “*thèse de doctorat*“, Ecole Doctorale, Supélec, 2011.
- [16] J.P. Caron et J.P. Hautier, « Modélisation et commande la machine asynchrone » *Edition TECHNIP, 1995* .
- [17] Frédéric Vernet, « Approche géométrique de la modélisation des machine électriques en vue de l’observation et de la commande ». “*thèse de doctorat*“, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [18] Guy Séguier, Robert Bausière, Francis Labrique, «Electronique de puissance: Structures , fonctions de bases , principales applications», 8e *édition Dunod, Paris, 2004*.
- [19] BIMAL K. Bose, « Power Electronics and AC Drive » , *Prentice Hall PTR . 2002*.
- [20] AOUZELLAG Haroun. « Stratégies de commande d’un véhicule hybride», “*Mémoire de Master*“, université A-Mira Bejaia, 2013.
- [21] Marc DEBRUYNE « Apport de l’électronique de puissance pour la traction électrique» technique d’ingénieur. 2010.
- [22] Kevin Tanguy, « Modélisation et optimisation de la recharge bidirectionnelle de véhicules électriques Application à la régulation électrique d’un complexe immobilier », Québec, Canada, 2013.
- [23] Nicolas ALLALI, «Convertisseur haut rendement à dimensionnement réduit pour batterie hybridée puissance/énergie de véhicule électrique : Principe de source de courant contrôlée ». “*thèse de doctorat*“, École doctorale SPI (Ecole Centrale de Lille).
- [24] Loic BOULON, «Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d’énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d’énergie.».“ *Mémoire de master* “, Université de Franche-Comté.

Annexes

Annexe 1

Paramètre physique du véhicule

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

Annexe 2

Paramètre du Système de transmission

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

Annexe 3

Paramètre de la Machine électrique

Paramètres	Symboles	Valeurs
Résistance de stator	R_s	0.142 Ω
Résistance de rotor	R_r	0.126 Ω
Inductance de rotor	L_r	0.08314 H
inductance de stator	L_s	0.08314 H
inductance cyclique mutuelle stator-rotor	L_m	0.08230 H
Moment d'inertie	J	0.2 N.m
Nombre de paire de pole	p	1
Coefficient de frottement	f_{vis}	0,003

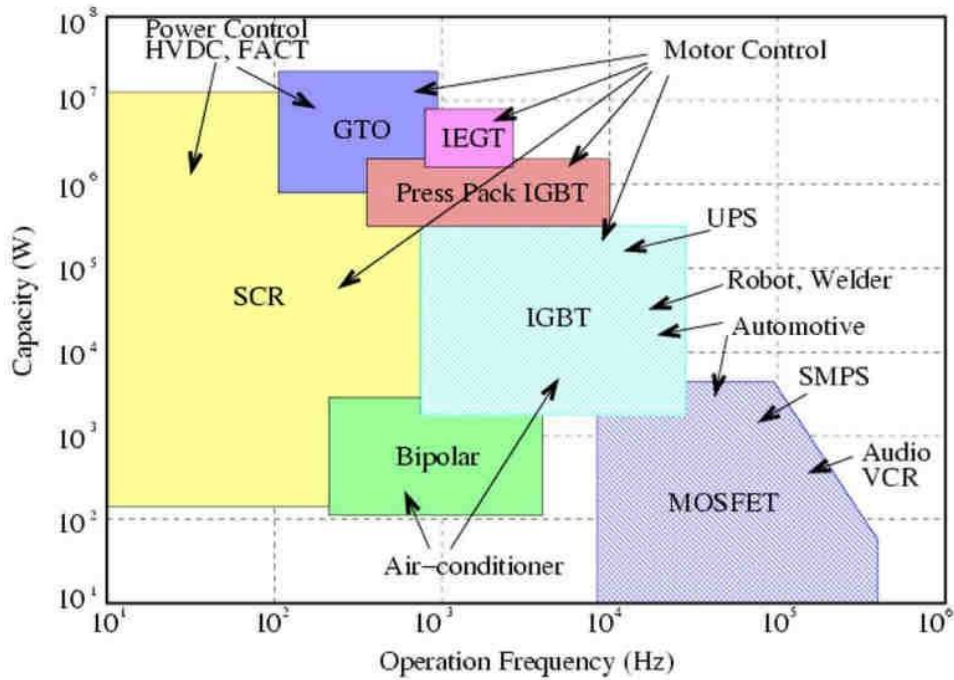
Annexe 4

Paramètre de l'onduleur

Paramètres	Symboles	Valeurs
L'indice de modulation	m	20
Le taux de modulation	r	0.75
la fréquence de la porteuse	f_p	1000
la tension de référence	f_m	50
Amplitude du signal sinusoïdale	V_a	150
Amplitude du signal de porteuse	V_p	200

Annexe 5

Représentation des différentes technologies utilisées dans les convertisseurs d'électronique de puissance (Onduleurs, Hacheurs, Redresseurs ...etc).



Annexe 6

Paramètre de la batterie utilisée (Lithium-Ion)

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

Annexe 7

Commande Scalaire

Il existe différents types de commandes scalaires (en passant par les courants ou bien par les tensions), néanmoins la finalité reste dans tous les cas la même. Une première phase consiste à contrôler l'amplitude du flux (le maintenir à sa valeur nominale), une seconde étape consiste quant à elle à contrôler le couple.

Effectivement, le modèle inverse d'une machine tournante nous conduit à contrôler le couple pour imposer la vitesse de rotation ou la position de l'arbre.

On remarquera qu'une commande scalaire permet de contrôler le couple en régime permanent, alors qu'une commande vectorielle permet de contrôler le couple en régime dynamique.

Nous nous sommes intéressés à une commande scalaire en passant par les tensions, ainsi nous avons réalisé un contrôle des flux à l'aide des tensions statoriques.

1. Aspects théorique :

Lors de la réalisation d'une commande scalaire la première étape est de contrôler le flux. Pour une commande en tension la loi de commande est simple :

$$V_s = \Phi_s \cdot \omega_s$$

Où V_s est la valeur efficace d'une tension simple statorique, Φ_s représente l'amplitude du flux statorique et ω_s la pulsation statorique (avec $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$). On cherche donc à maintenir l'amplitude du flux à sa valeur nominale, avec :

$$\frac{V_s}{f_s} = 2\pi \cdot \Phi_s$$

Seulement cette écriture n'est valable que dans l'hypothèse où $R_s = 0$. L'influence du terme $R_s \cdot I_s$ n'est néfaste que pour les faibles valeurs de f_s , la stratégie de commande consiste donc à introduire une fonction BOOST (dans la loi de commande $\frac{V_s}{f_s} = \text{constante}$) qui compense les effets de $R_s \cdot I_s$ pour les faibles valeurs de f_s (ou ω_s). On va maintenir V_s à un niveau constant (V_{boost}) pour les valeurs faibles de f_s .

Une fois le flux contrôlé, la deuxième étape consiste à commander le couple, qui peut être écrit sous la forme suivante (si $V_s = \Phi_s \cdot \omega_s$):

$$C_{em} = 3 \cdot p \cdot \omega_s^2 \cdot \frac{\frac{R_r}{\omega_r}}{\left(\frac{R_r}{\omega_r}\right)^2 + (\sigma \cdot L_r)^2}$$

où C_{em} est le couple électromagnétique, p est le nombre de paires de pôles, ω_r la pulsation rotorique (avec : $\omega_r = 2.p.f_r$), $R_r = \frac{R_r}{m^2}$ (avec : $m = \frac{1}{\sigma}$, rapport entre spires rotor/stator) et σ le coefficient de Blondel ou coefficient de dispersion (avec $\sigma = 1 - \frac{M^2}{l_s \cdot l_r}$). Or pour un point de fonctionnement proche du synchronisme on peut considérer :

$$\left(\frac{R_r}{\omega_r}\right)^2 \gg (\sigma \cdot l_r)^2$$

Une fois le contrôle du flux réalisé on obtient Φ_s constante, la relation s'écrit donc :

$$C_{em} \approx \frac{3.p.\Phi_s^2.\omega_r}{R_r}$$

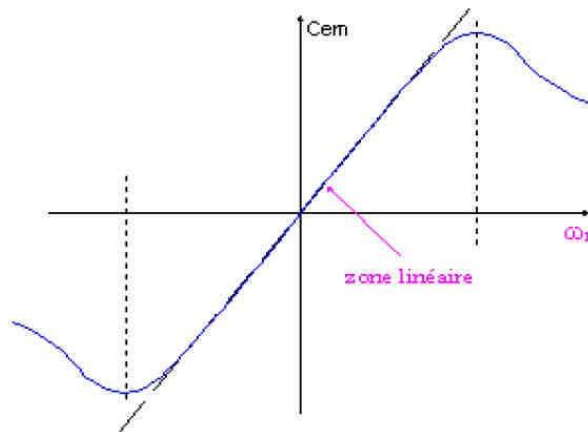
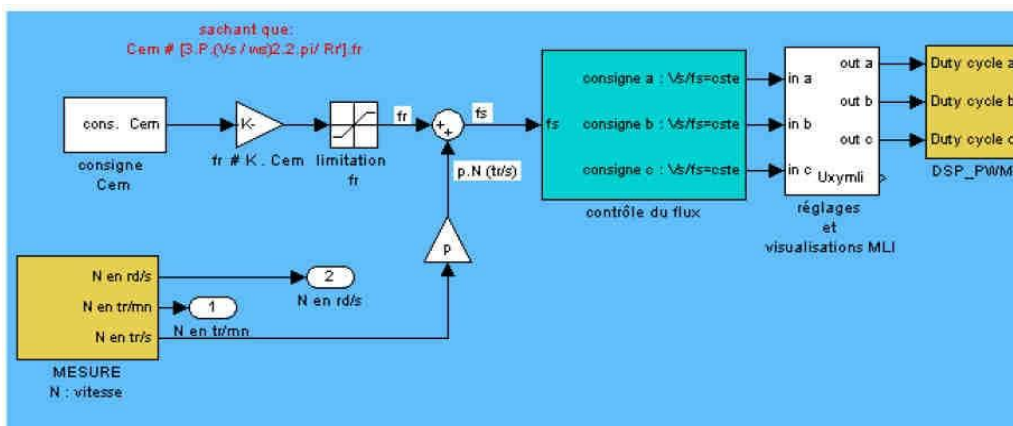


Figure 8 : caractéristique couple électromagnétique - pulsation rotorique

On va alors chercher à reconstituer ω_r (ou f_r) afin de commander le couple électromagnétique de la machine. Une fois f_r reconstituée et le couple commandé, l'asservissement de vitesse peut être mis en place.

2. Simulations sous MATLAB/SIMULINK

La commande scalaire du moteur asynchrone a été préalablement implémentée sous Simulink, nous n'avons donc plus qu'à vérifier notre commande scalaire et finalement contrôlé que notre modèle a bien le même comportement que le moteur.



Résumé

Ce travail de fin d'étude porte sur le véhicule électrique VE qui se définit par une automobile qui se propulse par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique.

Le premier axe de ce mémoire était orienté à des généralités sur les véhicules électriques.

Et c'était le deuxième axe de mémoire orienté à la modélisation de tous les éléments de la chaîne de traction du véhicule électrique.

Enfin dans notre travail, nous avons associé et simulé tous les éléments de la chaîne de traction, est obtenus Les résultats durant les simulations et étudié cette résultats obtenus.

Les mots clés :

Véhicule électrique VE, modélisation, chaîne de traction, association, simulation, résultats

يركز عمل نهاية الدراسة هذا على السيارة الكهربائية، والتي يتم تعريفها بواسطة سيارة يتم دفعها بواسطة محرك يعمل بالطاقة الكهربائية. كان المحور الأول من هذه الأطروحة موجّهًا إلى العموميات في السيارات الكهربائية. كما كان في المحور الثاني من هذه الأطروحة نمذجة جميع عناصر سلسلة الجر للمركبة الكهربائية. أخيرًا في عملنا، قمنا بربط ومحاكاة جميع عناصر سلسلة الجر، وحصلنا على النتائج أثناء المحاكاة ودرسنا هذه النتائج التي تم الحصول عليها.

الكلمات الدالة : السيارة الكهربائية ، النمذجة ، سلسلة الجر ، المحاكاة ، النتائج

This end-of-study work focuses on the electric vehicle VE, which is defined by an automobile which is propelled by an engine operating exclusively on electrical energy.

The first axis of this memory was oriented to generalities on electric vehicles.

And it was the second axis of memory oriented to the modeling of all the elements of the traction chain of the electric vehicle.

Finally in our work, we have associated and simulated all the elements of the traction chain, obtained the results during the simulations and studied these results obtained.

Keywords :

electric vehicle, modelling, traction chain, association, simulation, results