

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en

Electrotechnique

Option : Machines électriques

THEME

**Etude et Stratégies de Commande d'un
Véhicule Hybride Série**

Réaliser par :

- **Mr** MERFED Djamal
- **Mr** HAMROUN Kamal

Encadré par :

- **Mr** DICHE Arezki
- **Mr** GHEDAMSI Kaci

Promotion: 2012 / 2013

Remerciements

Au terme de notre travail nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

*Nous remercions notre promoteur, monsieur **DICHE Arezki** pour sa disponibilité et ses orientations afin de mener à bien notre travail. Nos remerciements vont également à notre Co-promoteur monsieur **GHEDAMSI Kaci** qui malgré son éloignement, nous a beaucoup aidés avec lucidité et efficacité dans les informations transmises et les orientations suggérées.*

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui nous ont encouragés pour aller au bout de notre travail, en particulier nos familles avec leur soutien indéfectible.

Nos derniers remerciements vont aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire de fin d'étude à :

A mes très chers parents.

A mes frères Karim, Nadir et sa femme et Faraxene.

A mes sœurs Dalila et son mari, Safia et son mari et Fariza

A mes Nièces et à mon petit neveu

A tous mes amis (es).

A tous mes collègues d'études.

A mon grand amour Rosa et sa famille

M. Djamal

DEDICACE

Pour leurs soutien au quotidien et leurs contribution du mieux qu'ils peuvent, ce travail ne peut être dédié en premier lieu que à ma famille : Mon père ALI , ma mère Malika , mon frère Mokrane et mes deux sœurs Kamilia et Lilia ainsi que à Na Djedjiga , Na Ouiza et son mari et Na Fazia et son mari, sans oublié bien sur mon grand père Rabah, ma grand mère Djouher , mes oncles et tantes Zohra, Saliha, Brahim, Mokrane et bien sur à Khali Achour, et enfin à toute ma grande famille.

Je dédie également ce travail :

A tous mes amis(es) /Merzouk et son epouse , Ghilas , boussad , Ahmed , Chabane , Aziz , Belkacem, Saïd (chi), Chafie , Mokrane et Moussa ainsi que Nadia , Samira , Soraya et Amal.

A tous mes colleges et camarades.

Enfin, je ne peux clore ces dédicace sans avoir une pieuse pensé à mon grand père Mohamed Amokrane qui ma durant presque tous mon cursus scolaire et universitaire apporté son soutien et son aide. Que dieu l'accueil dans son vaste paradis.

Merci à tous.

Kamal

Résumé

Le développement du véhicule électrique hybride demande de multiples compétences du fait de sa conception et sa gestion de l'énergie qui le classe dans les système pluridisciplinaire .En effet, diverses fonctionnalités y sont associées: la production et la distribution de l'énergie électrique à bord (alternateur, pile à combustible ,réseau de bord ...), la conversion de l'énergie électrique (machine électrique de traction, résistance de dissipation...), le stockage (batterie électrique , supercondensateur ...) ou encore la réalisation d'étage d'adaptation (convertisseur statique , bus continue ...) en plus d'autres domaines de la physique comme la mécanique (différentielle, réducteur, boîte de vitesse...), l'automatique (gestion local et global du système) ou encore la chimie (électrolytes, batterie électrochimique) sont également misent à contribution.

Dans notre travail, l'architecture série a été étudié. En effet, nous avons étudié et modélisé puis simulé tous les éléments de sa chaîne de traction, ainsi: un système de génération d'énergie électrique (réservoir , génératrice , moteur thermique), une machine synchrone à aimants permanents assurant l'intégralité de la traction des roues et un super condensateur comme élément de stockage ,des convertisseurs DC/AC et AC/DC ont été étudié en imposant des hypothèses simplificatrices pour certain composants telle le groupe électrogène et le super condensateur.

Nous avons également reconstitués à partir de tous ces éléments une chaîne de traction hybride série, simuler en deux mode de fonctionnement: toute électrique et hybride.

Enfin, avec la prise en compte des systèmes de stockage et de production d'énergies, ce VEH pourrait être plus fidèle à la réalité et plus pratique.

Mots – Clés : Pollution, Véhicule hybride série, Véhicule électrique, Traction, Chaîne de traction, Gestion de l'énergie, Les convertisseurs dans la traction.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
<u>Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides</u>	
Introduction	3
I.1. Historique	3
I.1.1.Chronologie du véhicule électrique avec quelques modèles	4
I.2. Principales configurations des véhicules électriques	5
I.2.1. Véhicule tout électrique	5
I.2.2.Véhicule hybride	6
I.2.2.1.Classification des véhicules hybrides	6
a. <i>Classification par hybridation</i>	6
b. <i>Classification par structure</i>	7
b. 1. Le véhicule hybride série	8
b.1.2. Principe de fonctionnement des VEH's série	8
b.2. véhicule hybride parallèle	9
b.3. Hybride mixte.....	10
I.2.2.2.Avantages et inconvénients des différents VEH's suivant_l'architecture	11
I.3.Vue d'ensemble et analyse des composants de la structure hybride série	11
I.3.1.Les sources d'énergies	12
1 .Le groupe électrogène	12
2. Les accumulateurs	12
2.1. Les batteries.....	13
2.2. Les piles à combustible	14
2.3. Les super condensateurs.....	15
I.3.2.Les convertisseurs	15
I.3.2.1. Les convertisseurs (AC/DC).....	16
I.3.2.2. Les convertisseurs (DC/AC).....	16
I.3.3. Les machines électriques de traction	16
I.3.3.1. Machines à courant continu (MCC)	17
I.3.3.2. Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	17
I.3.3.3. Machine synchrone aimant permanent (MSAP).....	17
I.3.3.4. Machine asynchrone (MAS).....	17
I.3.3.5.Avantages et inconvénients de quelques types de machines	18

I.4.Détails sur quelques modèles de véhicules hybrides.....	19
Conclusion	20
Chapitre II : Eléments électriques et fonctionnement d'une chaîne de traction d'un VEH série : Etude, modélisation et simulation	
Introduction	22
II.1. Eléments électriques d'une chaîne de traction d'un VEH série	22
II .1.1. La source d'énergie	23
<i>a-</i> Le moteur thermique	24
<i>b-</i> Génératrice électrique	24
<i>c-</i> Simulation de la source de tension.....	24
II .2. Le stockage de l'énergie	25
II .2.1. Les supers condensateurs	26
II .2.1. 1. Différents type de super condensateur	26
II .2.1.2. Caractéristiques du supercondensateur	27
II .2.1.3. Modélisation d'un super condensateur	27
II .3. Les convertisseurs AC/DC.....	28
II .3.1. Le redresseur à MLI	28
II .3.1.1. Avantage du redresseur à MLI	28
II .3.1.2. Principe de fonctionnement	29
II .3.1.3. Différent Commande MLI du Redresseur	29
1- MLI à Bande d'hystérésis	29
2- MLI à échantillonnage périodique.....	30
3- MLI à porteuse triangulaire	30
4- MLI vectorielle	30
II .3.1.4. Modélisation du redresseur à MLI.....	31
<i>a-</i> Redresseur MLI dans le référentielle triphasé.....	32
<i>b-</i> Redresseur à MLI dans le référentiel fixe $\alpha\beta$	33
<i>c-</i> Redresseur à MLI dans le référentiel tournant dq	34
II .3.1.5. Méthodes de contrôle du redresseur à MLI	35
II .3.2. Simulation d'un redresseur à MLI.....	36
II .3.2.1. Calcul des régulateurs	37
<i>a-</i> Régulateur de courants	37
<i>b-</i> Régulateur de tension du bus continue	37
II .3.2.2. Résultats de la simulation	38
II .4. Les convertisseurs (DC/AC)	39
II .4.1. L'onduleur à MLI.....	39
II .4.1.1. Modulation naturelle (sinus- triangle).....	40

II .4.1.2. Choix du rapport de modulation	40
II.4.1.3. Modélisation de l'onduleur à MLI	41
II 4.2. Simulation de l'onduleur à MLI.....	43
II .4.2. 1. Résultats de la simulation.	44
II .5. La machines synchrones à aimant permanent.....	45
II.5.1. Les aimants permanents.....	45
II .5.2. Différents Structures des MSAP.	46
II .5.3. Principe de fonctionnement d'une MSAP.....	46
II .5.4. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent.....	47
II .5.4.1. Les hypothèses	47
II .5.4.2. Convention	47
II .5.4.3. Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents	48
a- <i>Repère statorique</i>	48
b- <i>Repère rotorique</i>	48
1- <i>Transformation de Park</i>	49
2- <i>Transformation inverse de Park.</i>	49
3- <i>Interprétation physique de la transformation de Park</i>	49
II .5.4.3.1. Equations de la machine dans les axes d-q.....	50
II .5.5. Autopilotage de la machine asynchrone	51
II.5.6. Stratégie de commande de la machine synchrone à aimants permanents	52
II .5.6.1. Commande de la MSAP via un Onduleur de tension	52
II.5.6.2. Commande vectoriel d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents	52
II .5.6.2.1. Principe de la commande vectorielle	53
II .5.7. Paramètres de la Machine Synchrone à Aimants Permanents	53
II .5.8. Simulation de la commande vectorielle	54
II .5.8.1. Calcul des régulateurs PI.....	55
a- <i>Régulateur de vitesse</i>	55
b- <i>Régulateur de courant</i>	56
II .5.8.2. Résultats de la simulation	57
Conclusion	59
<u>Chapitre 3 : Comportement dynamique d'un véhicule hybride série</u>	
Introduction	60
III.1. Solution de transmission mécanique dans une chaine de traction hybride série	60
III.1.1. Solution avec boite de vitesse	60
III.1.2. Solution avec réducteur	61

III.1.2.1.Représentation de la transmission mécanique sous Matlab Simulink	62
III.2. Performances dynamiques imposées au véhicule.	62
III.3. Quelques cycles normalisés	63
III.3.1. Nouveau cycle européen de conduite	63
III.3.2. Le cycle FUDS (Federal Urban Driving Schedule)	63
III.3.3. Le cycle FHDS (Federal Highway Driving Schedule)	64
III.4. Profil d'élévation	64
III.5. Environnement du véhicule	65
III.5.1. Expression des forces	65
III.6. Etude de l'environnement du VEH série.....	67
III.6.1. Description	68
III.6.2.Représentation de l'environnement sous Matlab Simulink.....	68
Conclusion	68
<u>Chapitre 4 : Simulation du modèle du véhicule hybride série étudié</u>	
Introduction	70
IV.1. Paramètres de l'environnement imposé	70
IV.2. Caractéristiques du VEH série	71
IV.3. Calcul du couple résistant total.....	71
IV.4. Simulation Sous Matlab Simulink	72
A- Cas où la pente est nulle	72
IV.4.1. Simulation en Mode hybride	72
IV.4.1.1. Résultats de la simulation.....	74
IV.4.2. Simulation en Mode toute électrique	76
IV.4.2.1.Résultats de la simulation	77
IV.4.3. Interprétation des résultats.....	77
B- Cas où la pente est 20 %	78
IV.4.4. Résultats de la simulation pour un fonctionnement hybride.....	78
IV.4.5. Résultats de la simulation pour un fonctionnement tout électrique	78
IV.4.6. Interprétation des résultats.....	79
Conclusion	79
Conclusion Générale	81

Introduction Générale

Introduction Générale

L'âge d'or des énergies fossiles a mis à disposition de l'humanité une énergie abondante à faible coût. Cela a permis un développement effréné de la technologie qui produit actuellement des innovations majeures en un temps de plus en plus court, notamment des moyens de communications et de mobilités, de plus, les recherches qui s'opèrent actuellement témoignent d'une évolution continue. Mais cela n'a pas que des avantages, en effet, nul ne peut ignorer les signes (tempête, inondation, canicule...) d'un réchauffement climatique probable comme conséquence de la forte industrialisation et également de l'augmentation du trafic routier qui à lui seul contribue d'une manière conséquente à ce réchauffement et à la dégradation de l'environnement avec un taux considérable d'émissions de gaz à effet de serre.

Conscient de leurs responsabilités dans ce problème de pollution, les constructeurs automobiles investissent pour produire des véhicules moins polluants. Pour atteindre cet objectif, différentes stratégies ont été mises en œuvre tel : l'optimisation du carburant et le filtrage des émissions en sortie du véhicule conventionnel, néanmoins ces techniques, malgré leurs efficacités, elles reposent toujours sur la traction thermique. Par ailleurs, d'autres stratégies plus prometteuses sont adoptées, la conception d'un véhicule tout électrique avec zéro émission semble à priori la meilleure solution, toutefois, le retard et le manque de développement des moyens de stockage d'énergie électrique remet en cause la fiabilité de cette solution à court et à moyen terme vu que ces derniers définissent l'autonomie de ce type de véhicule qui de ce fait est très insuffisante et avec un temps de recharge très long.

Ainsi, depuis peu, de nouvelles structures alternatives au véhicule tout électrique et conventionnel qui allient les avantages des deux sont mises en place: ce sont les véhicules hybrides, ces derniers devraient permettre une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre et donc de la pollution.

Le développement du véhicule électrique hybride demande de multiples compétences du fait de sa conception et sa gestion de l'énergie qui le classe dans les systèmes pluridisciplinaires. En effet, diverses fonctionnalités y sont associées: la production et la distribution de l'énergie électrique à bord (alternateur, pile à combustible ,réseau de bord ...), la conversion de l'énergie électrique (machine électrique de traction, résistance de dissipation...), le stockage (batterie électrique , supercondensateur ...) ou encore la réalisation d'étage d'adaptation (convertisseur statique , bus continue ...) en plus d'autres domaines de la physique comme la mécanique (différentielle, réducteur, boîte de vitesse...), l'automatique

Introduction Générale

(gestion local et global du système) ou encore la chimie (électrolytes, batterie électrochimique) sont également misent à contribution.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier une structure du vehicule électrique hybride qui est la configuration série

Le premier chapitre fera un état de l'art des véhicules électriques hybrides ainsi que leurs classifications selon l'architecture et le taux d'hybridation, par la suite, il présentera d'un point de vue global la configuration hybride série avec les différentes technologies susceptibles d'être utilisées pour ce type de configuration.

Le deuxième chapitre fera office de la présentation des divers organes électriques de l'architecture série et présentera une étude détailler (définition et modélisation) et également une simulation sous Matlab simulink pour chaque un de ces organes.

Le troisième chapitre sera consacre à l'étude de l'environnement du véhicule et la définition des parties mécaniques constituant le véhicule électrique hybride série avec les contraintes aux quelles doit faire face ce dernier en régime dynamique.

Enfin, le quatrième chapitre accomplira le travail effectuer lors des précédent chapitre, il présentera la simulation sous Matlab Simulink d'un véhicule électrique hybride série avec tous les organes électriques et mécaniques assemblés afin de constitués sa chaine de traction. La simulation sera faite pour deux modes de fonctionnement : mode hybride et en mode toute électrique.

Introduction

Le nombre des véhicules en circulation ne cesse d'augmenter, et même si les nouveaux moteurs thermiques sont de moins en moins polluants, les problèmes de pollution sont de plus en plus critiques, particulièrement pour les gaz à effet de serre responsables du réchauffement de la planète. Actuellement, le moyen le plus efficace pour lutter contre ces émissions est la mise en place des normes de plus en plus restrictives pour les véhicules neufs. Malgré les avancées technologiques, les limites imposées par les normes seront trop restrictives pour être respectées par les moteurs thermiques, à plus ou moins long terme. Ces normes restrictives obligent les constructeurs d'automobiles de prévoir des nouvelles technologies qui permettront de rendre les véhicules moins polluants. Les véhicules électriques sont apparus, dans un premier temps, comme une solution prometteuse. Mais leur faible autonomie combinée à un coût trop élevé a freiné leurs développements. Une autre solution semble aujourd'hui voir le jour : les véhicules hybrides. L'expérience du véhicule électrique ayant servi de leçon, l'introduction des véhicules hybrides sur le marché ne se fera que si les performances globales de ces véhicules (autonomie, vitesse) atteignent au minimum celles du véhicule classique. Dans ce premier chapitre, on donnera un aperçu général sur l'état de l'art des véhicules écologiques, l'historique de ces véhicules ainsi que leurs définition, classification et les configurations possibles, on définira les composants probables pour le montage de ce type de véhicule et qui diffèrent selon le constructeur.

I.1. Historique

Le véhicule électrique est une technologie qui ne date pas d'aujourd'hui, il existe depuis environ un siècle et demi et il ne cesse de se développer. En effet, les premiers véhicules électriques motorisés ont fait leurs apparitions à la fin du 19^{ème} siècle, dans un premier temps, pour être une alternative à la traction humaine. Le 1^{er} véhicule fait son apparition dès 1881, **Charles Jeantaud** démarre avec sa *Tilbury*, mais hélas, au bout de 100 m la voiture part en fumée. Une décennie plus tard, soit en 1899, le belge **Camille Jenatton** inventa la célèbre voiture de course « *la jamais contente* » qui établit un record à l'époque avec une vitesse de 100km/h, mais cela ne pouvait voiler des inconvénients majeurs tel le manque d'autonomie et la difficulté de commande de ce type de véhicule d'où le fait qu'il n'a pas pu s'imposer comme un moyen efficace de transport, cette situation s'aggrava encore avec le développement d'un autre type de véhicule, cette fois-ci à propulsion thermique, plus

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

robuste et plus autonome, cette technologie a vite été adoptée par le marché et le public pour devenir le moyen de mobilité routière le plus utilisé. Néanmoins, après des années de domination, des inconvénients commençaient à apparaître même pour celle-ci puisque il s'avérait qu'elle est dépendante de plusieurs paramètres variables et parfois incontrôlables tel la fait que sans pétrole ;élément généralement importer par les grandes industries et qui se fait rare en temps de guerre comme ce fut le cas lors de la deuxième guerre mondiale (1939 et 1945), on ne peut utiliser un véhicule thermique ainsi que lors de crise avec les chocs pétroliers (1973 et 1990), ajouté à cela, la pollution qu'engendre une utilisation massive de la propulsion thermique. Tout cela fait que la solution de l'électrique n'a jamais été oubliée et les recherches n'ont jamais cessées d'aller dans ce sens mais juste qu'on en parlait vraiment de cette solution qu'en temps de crise, cette logique a changé depuis que les effets de la pollution menace la planète. De ce fait, une autre approche plus sérieuse et plus volontaire est engagée dans la recherche et l'amélioration de la technologie de l'automobile électrique et ce depuis déjà les années 70, ce qui a permis de concevoir des prototypes et des modèles variés, toutefois, ils restent toujours incapable de fournir des performances au moins proche de celle d'un véhicule thermique.

Dans les années 90, une nouvelle solution qui consistait en un compromis entre l'amélioration de ces performances et la réduction des polluants a été trouvée, réunir la technologie thermique et celle électrique dans un même véhicule qu'on appela alors la technologie hybride. L'apparition du véhicule hybride a ouvert de nouvelles perspectives, au bout de quelques années, de nombreux constructeurs ont mis sur le marché des prototypes qui pour certains ont été une référence et un succès commercial tel la **Prius** hybride conçue par **TOYOTA** en 1998.

Le 21^{ème} siècle s'annonce prometteur pour le véhicule hybride et plus encore pour le véhicule toute électrique vu que de nouvelles conceptions de plus en plus développées et améliorées ne cessent d'apparaître d'année en année.

I.1.1. Chronologie du véhicule électrique avec quelques modèles

Depuis 1981 à ce jour, plusieurs voitures électriques ont été conçues, et de nombreux constructeurs ont proposés leurs prototypes. Le tableau (I.1) expose une chronologie réduite pour ces derniers.

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

années	Constructeur/inventeur	Autonomie	vitesse
1981	Charles Jean Taud	100 m	
1894	Henry .G .Morris & Pedro .G. Salomon	40km	32km/h
1899	Camille Jenatzy		100 km/h
1911	Detroit electric	130km	
1940	Paul Arzens	100km	70km/h
1941	Jean Albert Gregoire	250km	42km/h
1941	Peugeot	250km	42km/h
1947	Nissan Toyota electric	65km	35km/h
1959	Renault	60km	60km/h
1967	Ford	40 à 60km	64km/h
1984	Peugeot	140km	100km/h
1985	Renault	120km	80km/h
1997	Toyota		
2003	Renault	140km	
2010	BMW		

Tableau I.1 : Chronologie du véhicule électrique avec quelques modèles

I.2. Principales configurations des véhicules électriques

I.2.1. Véhicule tout électrique

Ce sont des véhicules qui n'ont comme sources d'énergies qu'un accumulateur rechargeable par la voie d'une source extérieure. Actuellement les VTE proposés sont exclusivement urbains, leur autonomie est de 70 à 120 Km avec des batteries en Plomb-Acide et cadmium-nickel et de 150 à 200 km avec des batteries Nickel-Métal-Hydrure et Lithium. Afin d'accroître leurs autonomies, ces véhicules sont dotés de systèmes de conversions réversibles pour récupérer l'énergie de freinage.

I.2.2.Véhicule hybride

En principe, un véhicule est dit hybride lorsque celui-ci est muni de deux sources de différentes natures. Or, cela peut induire à l'erreur vu que même un véhicule traditionnel procède deux sources. Selon International Energy Agency, la définition la plus appropriée citée dans un rapport technique est que : un véhicule hybride a un groupe motopropulseur dans lequel : L'énergie peut être transmise par au moins deux dispositifs de conversions d'énergies différentes (moteur thermique, moteur électrique...).

Tirant l'énergie d'au moins deux dispositifs de stockage différents (réservoir de carburant, batterie, super condensateur...).Au moins un des flux le long duquel l'énergie peut circuler d'un dispositif de stockage aux roues est réversible, tandis qu'au moins un flux est irréversible. Dans un VEH, le dispositif de stockage d'énergie réversible fournit l'énergie électrique.

I.2.2.1.Classification des véhicules hybrides

On distingue deux types de classification :

a. Classification par hybridation

C'est une classification qui ne prend pas en compte la structure des véhicules mais plutôt les fonctionnalités qu'ils peuvent réaliser selon leurs taux d'hybridation. Cette classification est surtout utilisée par les constructeurs et se distingue par quatre niveaux : Micro hybride, Mild hybride, Full hybride, Plug-in hybride. La fonction et la différence de chacun de ces hybrides sont définies dans le tableau (I.2). [Lhom01]

type	Fonctions	Gain en carburant	Exemples de véhicules
Micro hybrid (Stop/Start hybrid)	-Arrêt du Moteur thermique (Mth) : chaque fois que le véhicule est à l'arrêt, le Mth est stoppé afin de moins consommer. -Redémarrage du Mth : la Machine Électrique (ME) (alterno-démarrreur) intégré redémarre le Mth quand le	5 à 8 %	Citroën C3 Toyota Crown GM Saturn

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

	<p>conducteur active la pédale d'accélérateur ;</p> <p>-Accélération : l'alternateur-démarrateur peut aider le Mth au démarrage et pendant de courtes accélérations ;</p> <p>-Mode normal : le Mth fonctionne seul.</p>		
Mild hybrid	<p>La principale différence entre le Micro et le Mild hybrid est que l'alternateur-démarrateur intégré est remplacé par un ME séparé.</p> <p>La ME propulse rarement le véhicule seule, elle assiste plutôt le Mth.</p> <p>La ME, l'alternateur et les batteries sont plus puissantes et donc jouent un rôle plus important dans le fonctionnement du véhicule.</p>	20 à 30 %	<p><i>Honda Insight</i></p> <p><i>Honda Civic</i></p> <p><i>Honda Accord</i></p>
Full hybrid	<p>La ME peut propulser souvent le véhicule seule, particulièrement pour une conduite en ville ;</p> <p>Le Mth peut être plus petit car la ME est de plus grande puissance et peut donc fournir un plus grand couple dans une gamme de régime donnée.</p> <p>Le système de commande est plus complexe afin d'optimiser la gestion de puissance.</p>	30 à 40 %	<p><i>Toyota Prius</i></p> <p><i>Ford Escape</i></p>
Plug-in hybrid	<p>La ME, l'alternateur et les batteries sont considérablement de plus grandes puissances ;</p> <p>Le système de commande doit empêcher de recharger la batterie tant que celle-ci n'a pas atteint un niveau minimal. Si celui-ci est atteint alors on passe en fonctionnement Full hybrid.</p>	100% ou 30 à 40%	<p><i>Gruau</i></p> <p><i>Microbus</i></p> <p><i>Dassault-Heuliez</i></p> <p><i>Cleanova</i></p> <p><i>Daimler-Chrysler</i></p> <p><i>Sprinter</i></p>

Tableau I.2 : Classification des VEHS par rapport à son niveau d'hybridation

b. Classification par structure

Plus détaillé, cette classification est la plus utilisée, elle permet de mettre en évidence les couplages mis en jeu et les équipements utilisés. On note alors trois types de véhicules :

- Véhicule hybride série.
- véhicule hybride parallèle.
- véhicule hybride mixte.

1. Le véhicule hybride série

Considéré comme le plus simple des VEH, ce type de configuration peut même être assimilé à un véhicule tout électrique étant donné que la propulsion est intégralement électrique assurée par une ou plusieurs machines électriques. L'énergie provient généralement d'une batterie, d'un groupe électrogène (moteur thermique et génératrice) ou les deux simultanément. L'inconvénient majeur dans ce type de véhicule est le fait d'avoir trois machines embarquées alors que seule une machine électrique fournit la puissance de propulsion.

1.2. Principe de fonctionnement des VEH's série

Le groupe électrogène fournit une puissance moyenne, les pics de puissance sont quant à eux assumés par le dispositif de stockage d'énergie.

En effet, le moteur thermique entraîne une génératrice qui débite sur une batterie et alimente le ou les convertisseurs du ou des moteurs électriques de traction. En zone urbaine, le moteur électrique est alimenté par la seule batterie initialement chargée donc, un système de propulsion 100% électrique où l'autonomie varie selon le type de batterie utilisée. Un autre mode de fonctionnement survient lorsque la batterie se décharge, le véhicule passe alors à l'hybride et le moteur thermique démarre en entraînant la génératrice qui prend le relais en alimentant le moteur de traction et en même temps recharger la batterie suivant une chaîne de transfert d'énergie représentée sur le schéma de la figure (I.1). Ce dispositif (groupe électrogène) procure aux véhicules une plus grande autonomie et permet une réduction des émissions de gaz et de polluants, .dans ce mémoire nous étudierons le VEH série avec la chaîne de traction composée de: réservoir de carburant, moteur thermique (combustion interne), génératrice synchrone, redresseur triphasé, filtre , batterie et machine de traction synchrone à aimant permanent .

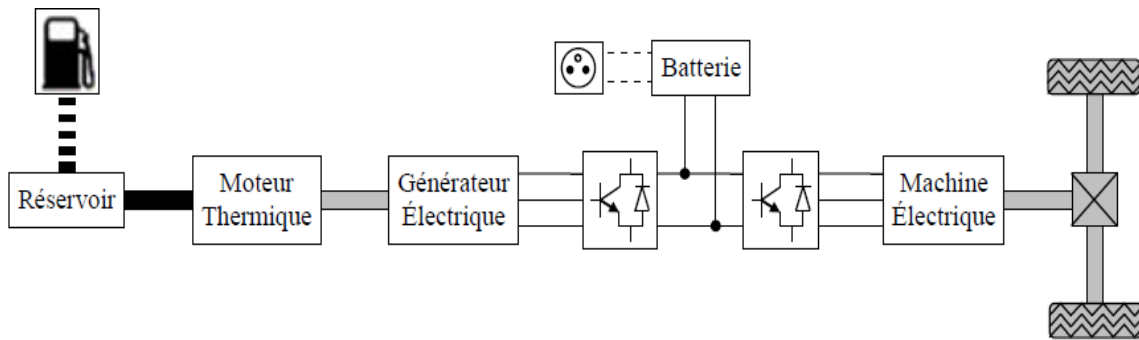


Figure I.1 : Architecture d'un véhicule hybride série

2. véhicule hybride parallèle

L'hybride parallèle est plutôt un véhicule thermique assisté par un moteur électrique. Dans cette structure et contrairement à la configuration série, le moteur thermique fournit sa puissance aux roues et participe directement à la traction en assistant la machine électrique. L'association de ces deux machines pour la traction permet de réduire considérablement leur volume et leur puissance par conséquent les émissions de gaz, ce qui son principale avantage.

Selon la structure et la conception du véhicule, on peut avoir deux sortes d'hybrides parallèles : À addition de couples ou à addition de vitesses.

- la structure à addition de couples additionne le couple de la machine électrique et la machine thermique afin de propulser le véhicule ou recharger les batteries .La connexion entre les deux se fait par courroie, poulie ou engrenage.
- La structure à addition de vitesses est principalement avantageuse pour les machines où le rendement énergétique est plus sensible aux vitesses qu'aux couples (moteur Stirling, turbine à gaz ...).la connexion dans ce cas est réalisé mécaniquement par un train planétaire (train épicycloïdale) ou électriquement par un transfo-moteur (ME dans le stator est alimenté par des bagues collectrices).

A noter que le rechargement de la batterie est assurée par la ME aidée par le moteur thermique ce qui est un autre avantage puisqu'on aura que deux machines embarquées au lieu de trois (série) ; mais la complexité de contrôle et de la mise en place de dispositif mécanique liant les deux machines reste un grand désavantage. Le schéma de la figure (I.2) illustre cette structure.

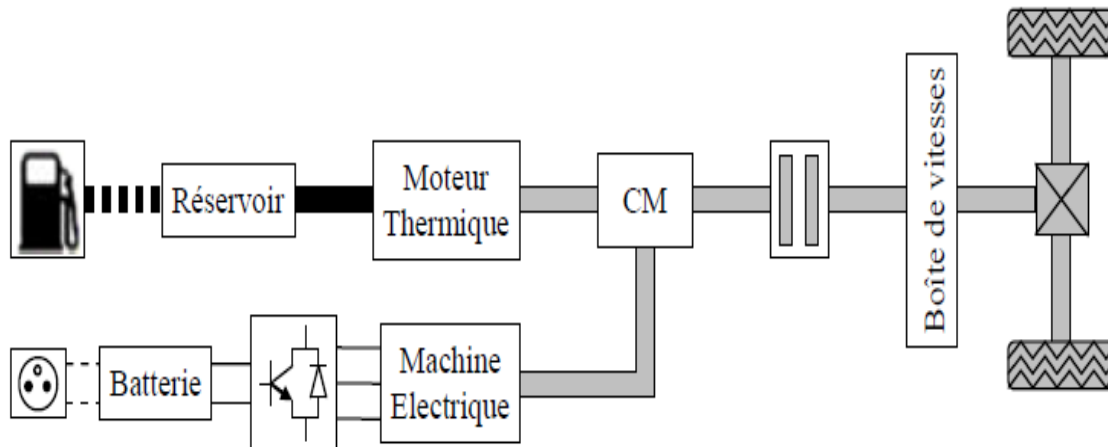


Figure I.2 : Architecture d'un véhicule hybride parallèle

3. Hybride mixte

C'est une combinaison entre l'hybride parallèle à addition de couple et celle à addition de vitesse. Il existe diverses conceptions, la plus connue est celle utilisée par Toyota, un véhicule constitué de deux machines électriques, un moteur thermique et d'un train planétaire, la première machine est de faible puissance (quelques kw) et la seconde quelques dizaine de kw. Elles réalisent respectivement l'addition du couple et l'addition de la vitesse. À basse vitesse la traction est toute électrique et lors des fortes accélérations, le moteur thermique s'allume et fournit une puissance supplémentaire. La figure (I.3) ci-dessous donne le schéma de cette structure.

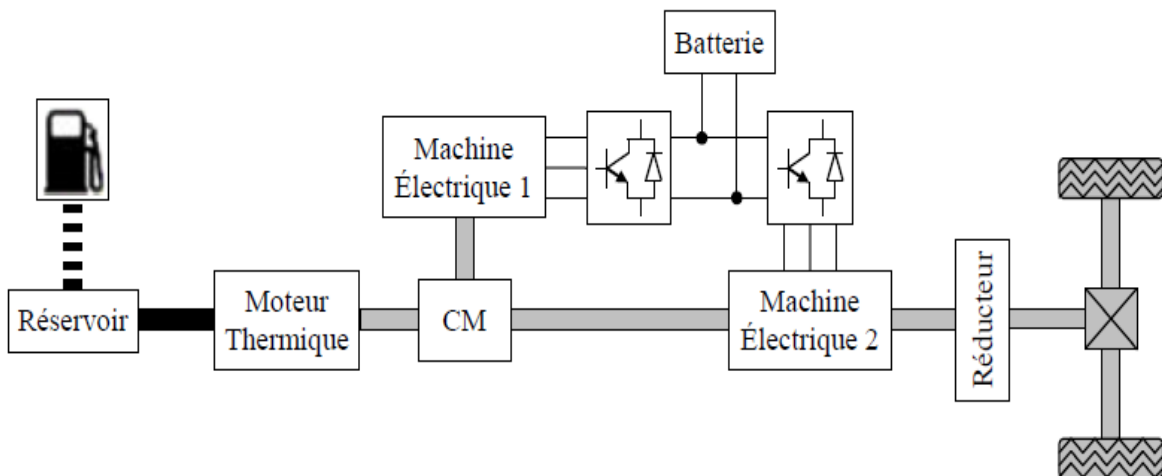


Figure I.3 : Architecture d'un véhicule hybride mixte

I.2.2.2. Avantages et inconvénients des différents VEH's suivant

l'architecture

Il existe différents types de véhicule électrique hybride. Généralement, leur classification s'effectue suivant leur configuration interne (série, parallèle ou mixte), chaque configuration a ses avantages mais également ses inconvénients. Le tableau (I.3) ci-dessous résume ces avantages et ces inconvénients. [Aima02]

Configuration	Avantages	Inconvénients
<u>Hybride série</u>	-autonome -Puissance comparable aux véhicules thermiques -batterie largement sous dimensionnée -Fonctionnement en mode zéro émissions	-Tout repose sur la performance du ME -masse élevée -coût élevé
<u>Hybride parallèle</u>	-Autonome et performant - zéro émissions en mode tout électrique	-Encombrement du système -masse élevée -coût élevé
<u>Hybride mixte</u>	Autonomie élevée -moins polluant	-Complexité de commande -Coût et masse élevée
<u>Toute électrique</u>	-Zéro émissions -silencieux	-Autonomie réduite -Coût élevé

Tableau I.3 : *Avantages et inconvénients des différents VEH's suivant l'architecture*

I.3. Vue d'ensemble et analyse des composants de la structure hybride série

Comme dans toute technologie et conception, le choix des composants et des outils restent la première étape, en tenant compte des résultats que l'on veut obtenir et de

l'environnement pour lequel cette conception ou cette technologie sera destinée. On aura ensuite à établir des modèles mathématiques pour les composants choisis afin de les étudier et aussi de les simuler. C'est l'objet du prochain chapitre de ce mémoire. Mais avant cela, on présentera d'un point de vue général les composants et les outils probables pour la conception d'une chaîne de traction de VEH pour ensuite établir notre choix et faire une étude plus approfondie pour chacun d'eux.

I.3.1. Les sources d'énergies

Comme l'indique sa définition, un véhicule hybride comporte deux sources d'énergies différentes : un groupe électrogène, un accumulateur.

1 .Le groupe électrogène

Il permet de fournir de l'énergie électrique pour la traction, le rechargement des batteries ou les deux en même temps. Ce système combine un moteur thermique puisant sa puissance de la combustion d'un fuel et une génératrice entraînée par ce dernier.

✓ Le moteur thermique

C'est un moteur alternatif à combustion interne permettant de produire du travail sous forme de rotation du vilebrequin à partir de la combustion d'un mélange air –gazole ou air-essence à l'intérieur d'un cylindre dans lequel se déplace un piston entre deux limites appelées point mort haut et point mort bas.

✓ La génératrice

Souvent machine synchrone, son rotor est entraîné par le moteur thermique. En exploitant les caractéristiques des machines synchrones, on obtient une tension triphasée aux bornes du stator qui représente la tension d'alimentation du convertisseur (AC/DC) dans le cas du véhicule hybride série.

2. Les accumulateurs

Problème majeur dans les véhicules électriques ou même dans multiples domaines, le stockage de l'énergie électrique est une technologie assez limitée et compliquée à la fois. Dans un véhicule électrique, cela se répercute sur l'autonomie qui sera réduite, ainsi les outils

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

de stockage utilisés jusque-là sont en général soit, des batteries, piles à combustibles ou des super- condensateurs.

2.1. Les batteries

De nos jours, la technologie des batteries est la plus utilisée. Différents prototype et modèles existent déjà sur le marché et d'autres encore sont au stade de la recherche, d'amélioration ou d'expérimentation. Leurs classifications s'effectuent suivant un nombre de conditions qu'elles doivent remplir tel :

- une bonne puissance massique (Wh/kg) synonyme d'une bonne autonomie.
- une tension stable.
- une durée de vie élevée (nombre de cycle de chargement).
- facile à entretenir et à recharger.

Actuellement, les batteries en Plomb et celle en Nickel –Cadmium sont les plus fiables et les plus utilisées avec un avantage pour les dernières qui sont plus performantes : durée de vie, énergie massique et entièrement recyclable. Récemment, cette technologie a connue de nombreux progrès avec de nouvelles conceptions et des modèles plus développés tels : les batteries Nickel-Métal-Hydrure (NiMH) ou Lithium-ion (Li-ion) qui fournissent une énergie relativement élevée donc une autonomie plus grande pour le véhicule. Néanmoins le prix reste encore un obstacle. Le tableau (I.4) présente quelques différentes technologies de batteries. [Boulo03]

	Plomb- Acide	Nickel- Cadmium	Nickel - Métal- Hydrure (NiMH)	Sodium- soufre (NaS)	Lithium- soufre du fer (LiFeS ₂)
Energie massique (Wh/Kg)	40	60	80	100	150
Puissance massique (W/Kg)	90	200	200	100	250

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

Durée de vie (Nbre de cycle de chargement)	100	2000	1500	800	100
Energie volumique (Wh/L)	90	120	130	150	180

Tableau I.4 : *Quelques modèles de batteries et leurs caractéristiques*

Pour des performances acceptables, les batteries devraient posséder les caractéristiques suivantes :

- énergie massique entre 15 et 30 kWh/Kg.
- puissance spécifique supérieure a 100 Wh/kg.
- puissance massique moyenne de 300 W/Kg.
- Une durée de vie de 600 à 1500 cycles.

2.2. Les piles à combustible

Système de stockage peu polluant, cette source d'énergie utilisée dans les véhicules électriques et bien d'autres applications permettraient de passer à une autonomie supérieure à 400 km, mais cette technologie doit encore faire des progrès et gagner en performances. Il lui reste beaucoup en matière de fiabilité, longévité et sécurité en plus du fait que certains matériaux constitutifs restent trop chers pour le marché de l'automobile tel le platine.

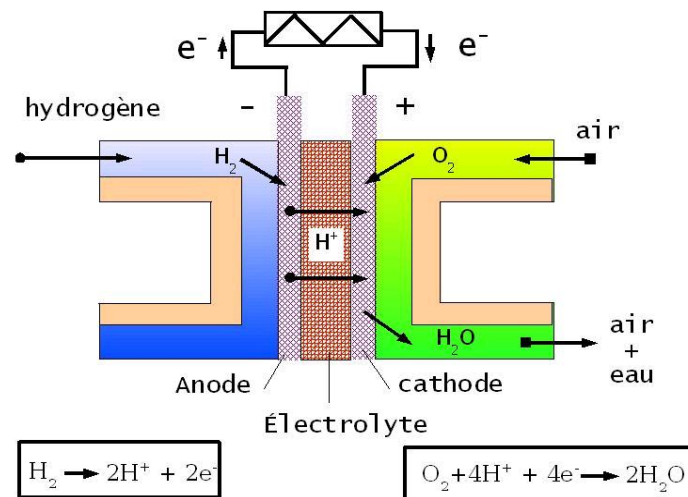


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

2.3. Les super condensateurs

Ce sont des systèmes électrochimiques de stockage d'énergie électrique ayant une grande cyclabilité et une densité de puissance élevée, les super condensateurs ont la même structure que les batteries ou les piles à combustible avec deux électrodes et un électrolyte. La différence se situe dans le mode de fonctionnement. Contrairement aux batteries, il n'y a pas de réactions électrochimiques dans ce système, mais un stockage de charge aux interfaces électrodes /électrolyte ou un inter-calage dans la structure de l'électrode. L'électrolyte est une matière organique (liquide ou solide) munie de base au charbon ou d'oxyde métallique (ultra capacité), ce moyen de stockage peut délivrer ou absorber une puissance massique élevée de l'ordre de 10kW/kg. Leur usage n'est pas fréquent.

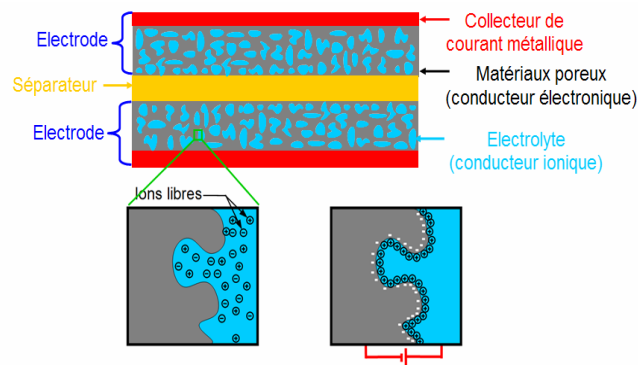


Figure I.5: Schéma simplifié d'un super condensateur et principe de stockage de charges

I.3.2. Les convertisseurs

Une chaîne de traction est un ensemble de composants couplés dans un ordre bien défini en vue d'un fonctionnement optimal. Ce couplage permet la circulation d'un flux d'énergie qui peut être unidirectionnel ou bidirectionnel. Mais l'échange entre ces composants peut s'avérer impossible puisque l'énergie de l'un peut être incompatible avec celle de l'autre (alternatif-continu, mécanique-électrique ...) et c'est pour cela que des convertisseurs ont été intégrés dans ces chaînes de traction pour justement rendre tous ces composants compatibles.

Les convertisseurs électriques sont très importants dans un véhicule électrique, ils permettent la liaison entre la ou les sources et la machine de traction, c'est ainsi que dans un véhicule

électrique hybride série, on trouve deux sortes de convertisseurs, un convertisseur (DC/AC) et un autre (AC/DC).

1.3.2.1. Les convertisseurs (AC/DC)

Ce sont des redresseurs qui transforment une source électrique d'entrée à courant alternatif en une source de sortie à courant continu, on distingue plusieurs types :

- Les redresseurs à diodes : ils établissent une relation rigide entre la tension continue de sortie avec la tension alternative d'entrée.
- Les redresseurs à thyristors : ils permettent de faire varier de manière continue le rapport entre la tension de sortie et celle d'entrée en agissant sur l'angle d'amorçage du thyristor.
- Les redresseurs mixtes : c'est une association de diodes de thyristors.

1.3.2.2. Les convertisseurs (DC/AC)

C'est un Composant nécessaire dans un VEH série utilisant une machine de traction alternatif. Ce sont les onduleurs : ils permettent de transformer l'énergie électrique à courant continu en une énergie électrique de courant alternatif et aussi de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de vitesse.

Il existe plusieurs structures pour ce type de convertisseur et la plus privilégié pour les véhicule électrique reste celle de l'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constitués par l'association d'un IGBT et d'une diode montée en anti parallèle commandé selon une loi de type MLI qui présente des avantages importants tel le fait qu'elle peut repousser vers les fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie. Ce qui facilite le filtrage de celle-ci et permet aussi de faire varier le fondamental de cette dernière.

1.3.3. Les machines électriques de traction

Le véhicule électrique doit son nom au fait que la traction est assurée par une machine électrique contrairement au véhicule conventionnel ou cette dernière est effectuée par un ensemble d'engrenages rattachés à un moteur thermique .

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

Les machines électriques utilisées dans les véhicules électriques sont multiples, 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 ce qui suit, on donnera une vue d'ensemble sur quelques types de machines en louant leurs avantages mais aussi en citant leurs inconvénients pour ensuite détailler la machine de notre modèle dans le prochain chapitre et qui est une machine synchrone à aimant permanent.

I.3.3.1. Machines à courant continu (MCC)

Ce sont les machines les plus utilisées dans les véhicules électriques de première génération, surtout celles à collecteurs et excitation indépendante. Utilisant un convertisseur d'induit de type hacheur et aussi une alimentation par un hacheur de petite puissance pour l'inducteur, ces machines ont été retenues par de nombreux constructeurs pour la traction dans les VE's. Néanmoins, la machine à courant continu reste une technologie à multiples inconvénients tel la difficulté de refroidissement, l'usure des balais et le coût élevé de construction due à la complexité de la machine : collecteurs, bobinage de l'induit. [Aima02]

I.3.3.2. Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Ayant des caractéristiques proches des machines CC à excitation indépendante, la MSRB permet d'optimiser facilement son rendement. Son fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse. Cependant, son rotor bobiné constitue un inconvénient majeur avec des pertes considérables mais aussi sa vitesse qui est limitée.

I.3.3.3. Machine synchrone aimant permanent (MSAP)

Ce sont des machines dont le rendement et la puissance massique sont élevés avec des aimants permanents à terre rare. Mais le prix élevé de ces derniers reste un grand obstacle du point de vue économique. Reste les modèles avec d'autres types d'aimants comme les ferrites qui sont susceptibles d'être utilisés dans la technologie des VE's. Mais ce type d'aimants doit encore faire des progrès concernant sa tenue en température et le prix.

Il y a aussi les MSAP's avec des aimants AlNiCo, ces derniers dont le prix est abordable et la production se fait en grande série peuvent être envisagés. Cependant, ils ne confèrent à la machine que de modestes performances.

I.3.3.4. Machine asynchrone (MAS)

Fabriquée en grande série, ces machines sont bien connues et constituent une solution envisagée par de nombreux constructeurs. Ayant de très bonnes performances de l'arrêt aux vitesses élevées avec un contrôle vectoriel et aussi la possibilité d'optimiser le rendement en associant un contrôle approprié du flux même si ce dernier reste moins bon que le rendement de la MS. Dans ce type de machines, le fonctionnement à puissance constante limite la vitesse par le rapport couple maximal sur le couple nominal ce qui amènera à une sous utilisation de la machine en couple pour étendre sa plage de vitesse.

I.3.3.5. Avantages et inconvénients de quelques types de machines

Les avantages d'une machine électrique peuvent lui valoir d'être utilisé comme élément de traction dans un véhicule électrique hybride, mais ces inconvénients peuvent aussi lui valoir d'être écarté de la solution de traction. Néanmoins, le tout ou rien n'existent pas et toute les machine peuvent prétendre à être choisi comme solution de traction, reste que le choix se porte souvent sur une machine qui a plus d'avantage que d'inconvénients .Le tableau (I.5) donne les inconvénients et les avantage de quelque machines électrique. [Daan12]

Type de machine	Avantages	Inconvénients
<i>Machine asynchrone (MAS)</i>	<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.
<i>Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)</i>	<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.

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

<p><i>Machine synchrone à aimant permanent (MSAP)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Technologie devenue Courante. -Puissance massique élevée. -Pas d'échauffement au 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.
<p><i>Machine synchrone à double excitation (MSDE)</i></p>	<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.5 : Avantages et inconvénients des différents machines utilisées dans les VEH's.

I.4.Détails sur quelques modèles de véhicules hybrides

De nombreux prototypes de véhicules électriques hybrides sont commercialisés et disponible sur le marché depuis plusieurs années. Les technologies embarquées utilisés dans ces véhicules diffèrent d'un prototype à un autre selon le constructeurs.les quatre véhicules hybrides cités dans le tableau (I.6) illustre les détails et la différence de ces technologies embarqués. [Bern15]

Type	Moteurs	Batterie/générateur Énergie embarquée	Autonomie/Consommation
<p>Toyota Prius <i>Hybride parallèle/série</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -Moteur thermique 4 cylindres essence 1,5 L: 42kW. -Moteur-générateur électrique (MSAP) :350 N · m, de 0 à 400 tr/min, 33 kW de 1 040 à 5600 tr/min. 	<p>NiMH chargées en interne 274 V, 6,5 A.h 54 L de carburant</p>	<ul style="list-style-type: none"> -3,6 L/100 km. (Japon) -5,1 L/100 km. (Europe)

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

Citroën Saxo Dynavolt <i>Hybride série</i>	-Groupe générateur 2 cylindres 2 temps 200 cm ³ , injection directe. -alternateur 6,5 kW MCC 20 kW.	NiCd 120 V-Chargeur embarqué 15 L de carburant	-80 km urbains sur batteries seules 70 km/h maximum. -Jusqu'à 340 km avec groupe thermique 120 km/h maximum.
Honda Insight <i>Assistance électrique intégrée</i>	-Moteur thermique 3 cylindres 1 L, 56 kW à 5 700 tr/min. -Boîte 5 vitesses. -Moteur-alternateur électrique intégré MAP : 10 kW crêtes à 3 000 tr/min.	Ni-MH 144 V-6,5 A · h 48 L de carburant	3,4 L/100 km sur autoroute 160 km/h maximum.
General Motors Precept <i>Hybride parallèle 4 roues motrices</i>	-Moteur Diesel 40 kW Common rail sur roues arrière. -Moteur électrique sur roues avant (MAS) : 35 kW crêtes et 18 kW.	NiMH + LiPoly	Moins de 3 L/100km
IVECO Altrobus 12 m Hybrid 86 <i>passagers</i>	-Groupe générateur Moteur Diesel 2,5 L. -Générateur triphasé 30 kW à 2 700 tr/min. -MAS 128 kW permanents et 164 kW maximum à 1 500 tr/min.	Pb-acide 600V - 100 Ah	-62 km/h maximum -Autonomie totale 140 km. -Autonomie en électrique pur : 25 à 30 km.

Tableau I.6 : Modèles détaillé de véhicules hybride

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté le véhicule électrique hybride dans un contexte général en présentant les différentes technologies disponibles et les éléments de base de la chaîne de traction de ces derniers. Cela nous a permis d'effectuer nos choix concernant l'architecture, le moteur, les convertisseurs, les sources d'énergies.

En effet, nous étudions une structure spécifique de la chaîne de traction qui est la configuration hybride série. Nous avons choisi le moteur synchrone à aimants permanents pour la traction des roues, un supercondensateur comme élément de stockage de l'énergie et

Chapitre I : Etat de l'Art des Véhicules Electriques Hybrides

deux types de convertisseurs : Un onduleur pour une conversion continue-alternatif et un redresseur assurant la conversion alternatif-continue.

Dans le chapitre qui suit, nous aborderons l'étude et la modélisation des éléments électriques du véhicule hybride série séparément, nous allons présenter les différents technique de commande associé à chaque un d'eux, une fois ces dernières établies, elles seront validé et simuler sous environnement Matlab Simulink.

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 électriques hybrides qui semblent être la meilleure solution pour réduire les polluants dus aux transports routiers. Cette solution combine entre les avantages des propulsions thermiques (autonomie) et électriques (faible pollution). Le système embarqué est de plus en plus complexe car, il multiplie les éléments de conversion d'énergie ainsi que les couplages entre les différents sous systèmes. La gestion et la commande 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 hybride série où la traction est assuré exclusivement par un moteur synchrone à aimant permanent lié mécaniquement à un différentielle. Dans ce chapitre, on définira les éléments d'une chaîne de traction hybride série avec une modélisation puis une simulation distinct pour chaque élément.

A noter que dans nos modèles de simulation, le système générant l'énergie électrique (réservoir -moteur thermique-génératrice) sera considéré comme une source de tension alternative triphasé réglable en amplitude et en fréquence.

II.1. Eléments électriques d'une chaîne de traction d'un VEH série

Le véhicule hybride série à une conception et une configuration bien déterminées. Cependant, les sous systèmes et éléments qui peuvent être utilisés pour la constitution de sa chaîne de traction ou autre accessoire peuvent différer selon le constructeur ou les besoins pour lesquels le véhicule est destiné. De ce fait, un modèle doit être défini au préalable afin d'entamer l'étude des éléments électriques de sa chaîne de traction. La figure (II.1) suivante illustre le modèle à étudié avec une machine de traction synchrone triphasé à aimant permanent. Les sous systèmes de ce modèle sont :

- ✓ un sous système de génération (non réversible) : groupe électrogène constitué d'un moteur thermique, d'un générateur électrique et d'un convertisseur électrique.
- ✓ un sous système de traction (réversible) constitué d'un convertisseur électrique, d'une machine électrique de traction et d'une transmission mécanique.
- ✓ un sous système de stockage d'énergie (réversible) composé d'un banc de supercondensateur, une inductance de lissage et d'un convertisseur électrique.

- ✓ un sous système dissipatif d'énergie (non réversible) constituée d'une résistance de dissipation et d'un convertisseur électrique. Cette résistance permet d'évacuer l'énergie de freinage dans l'éventualité d'une charge maximale des super condensateurs.

Tous ces sous systèmes sont couplés entreeux par un bus continu, matérialisé par un condensateurélectrostatique.[Lhom01]

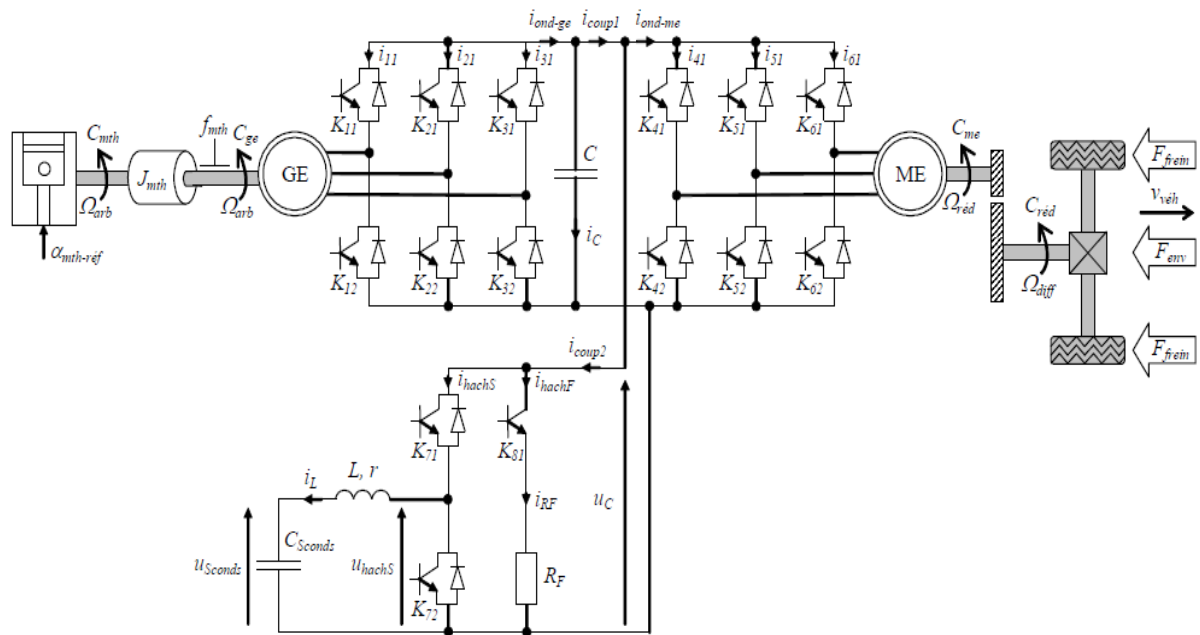


Figure II.1 : Synoptique du modèle de véhicule hybride série à étudier

II.1.1. La source d'énergie

C'est un groupe électrogène constitué d'un moteur thermique à combustion interne entraînant un générateur électrique, cette source intervient lors du fonctionnement en mode hybride, elle joue deux rôles puisque elle permet d'alimenter le moteur de traction à travers un écoulement de puissance défini et en parallèle, elle recharge l'élément de stockage. Dans ce qui suit, on considère cette source comme étant une source triphasée équilibrée avec R et L comme paramètres de la ligne illustrée dans la figure (II.2). Néanmoins, la présentation des éléments du groupe électrogène est utile puisqu'il permet de mieux comprendre le modèle et les énergies mises en jeu.

a- Le moteur thermique

Le moteur thermique est un convertisseur d'énergie unidirectionnel (chimique en une énergie mécanique). L'énergie chimique provient d'un réservoir rempli généralement par du gasoil ou de l'essence. L'énergie mécanique résultante entraîne le générateur dans le véhicule hybride série. Des moteurs classiques à combustion interne et à cycle alternatif : moteur à allumage commandé (essence) ou à allumage par compression (diesel) sont les plus utilisés. [Lhom01]

b- Génératrice électrique

La génératrice doit être de même dimension que le moteur thermique. Plusieurs types de génératrices peuvent être utilisés : une génératrice synchrone à aimants permanents peut être envisagée, mais le coût des aimants reste cependant un obstacle majeur. Une autre solution consiste dans l'utilisation d'une génératrice synchrone à excitation séparée, mais cela requiert l'utilisation du démarreur conventionnel. Pour notre modèle, le choix s'est porté sur une génératrice asynchrone triphasée qui peut développer une puissance maximale de 58 kW. Cette machine fonctionnera nécessairement en hyper synchrone, c'est-à-dire à une fréquence de rotation supérieure à la fréquence de synchronisme. [Lhom01]

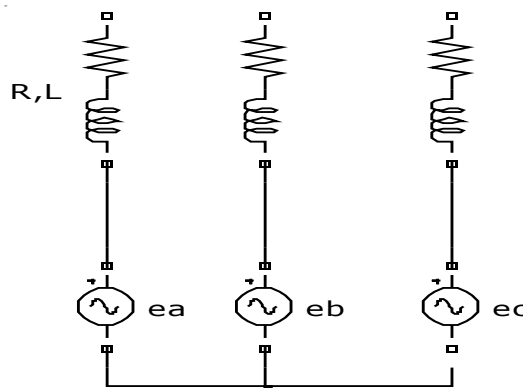


Figure II.2 : Source de tension alternative triphasée

c- Simulation de la source de tension

Le schéma bloc est présenté ci-dessous avec $\omega = 2\pi f$ ou f est la fréquence du réseau qui est de 50 Hz.

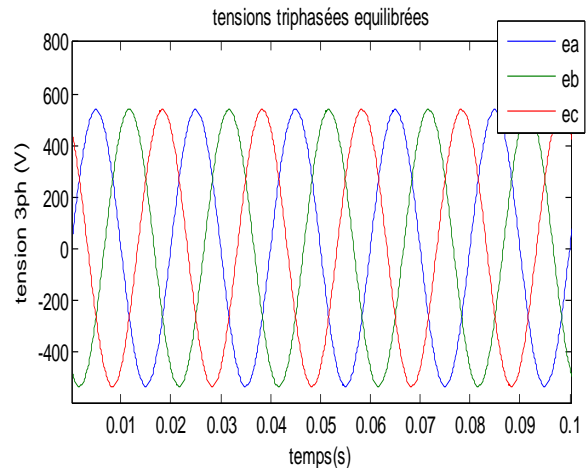
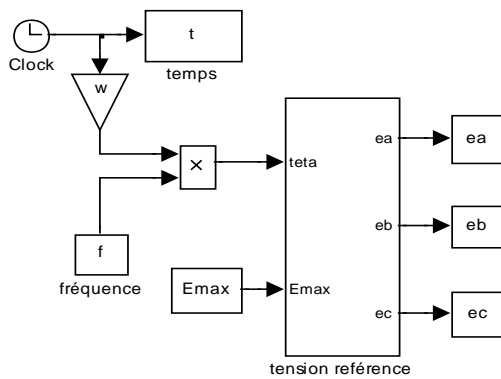


Figure II.3 : Schéma bloc de la source Figure II.4 : Allure des tensions de la source

II.2. Le stockage de l'énergie

L'électricité est un vecteur énergétique très pratique mais présente l'inconvénient d'être difficile à stocker. Or ce besoin de stockage croît avec le marché de consommation et plus particulièrement celui de l'automobile. Les différentes batteries de traction utilisées jusqu'à présent ne permettent pas d'atteindre un niveau des performances satisfaisant pour les applications futures des véhicules hybrides. Les fabricants des batteries n'étant pas très optimistes sur une évolution rapide des capacités et des performances des batteries de traction, il est intéressant de trouver d'autres solutions permettant de réaliser une source auxiliaire de puissance afin de moins solliciter la batterie pendant les régimes transitoires sévères. En effet, L'élément de stockage énergétique d'un véhicule électrique hybride doit être choisi selon plusieurs critères afin de répondre aux attentes du conducteur:

- Le déstockage d'énergie doit être rapide. Le stockage devra de la même manière avoir une bonne dynamique, ceci permettant une récupération énergétique de freinage accrue.
- La durée de vie des éléments devra permettre de réaliser un nombre important de cycles charge/décharge.
- L'énergie dans l'élément stockeur devra être suffisante pour tracter le véhicule sans utilisation du moteur thermique.

Parmi les différentes solutions technologiques possibles, celle des supercondensateurs et des volants d'inertie permettent de respecter les conditions précitées et semblent être la solution la plus intéressante du moins à court terme. Notre modèle de véhicule hybride série a pour élément de stockage un super condensateur comme le montre la figure (II.5).

II.2.1. Les supers condensateurs

Un supercondensateur se présente sous la même forme qu'un condensateur électrochimique classique à la seule différence qu'il ne possède pas de couche diélectrique dans sa partie électrolytique liquide. L'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire du solvant contenu dans l'électrolyte. En effet, ces supercondensateurs n'exploitent pas la polarisation diélectrique pour le stockage de l'énergie mais la double couche électrique qui apparaît à l'interface électrode/électrolyte.

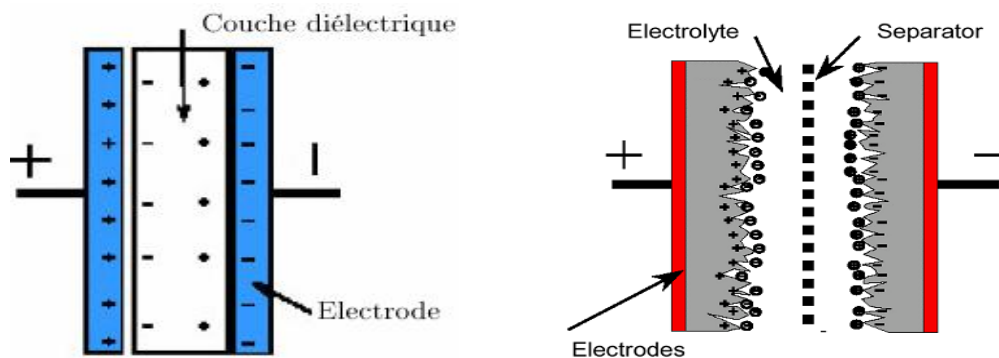


Figure II.5 : Structure d'un condensateur (gauche) et super condensateur (droite)

II.2.1. 1. Différents type de super condensateur

Il existe plusieurs types :

- ✓ Supers condensateurs électrochimiques : Le principe de fonctionnement des supercondensateurs électrochimiques combine celui des supers condensateurs électrostatiques et celui des accumulateurs.
- ✓ Les supers condensateurs aux électrodes à base des oxydes métalliques : Leurs surface spécifique est de l'ordre de $100\text{m}^2/\text{g}$ et leur capacité spécifique peut atteindre $600\text{F}/\text{g}$.
- ✓ Les supers condensateurs à base des polymères : Ce sont des produits ayant comme précurseur des fibres polymères de type Poly-Acrylo-Nitrile qui ont subi une calcination et une activation. Les surfaces spécifiques actives ont également des valeurs proches de $2000\text{m}^2/\text{g}$. [Cama04]

II.2.1.2. Caractéristiques du supercondensateur

Par rapport à un accumulateur, la durée de vie en terme de cycle est supérieure (1 million contre 1000 cycles). Le stockage de l'énergie se fait sous une forme électrostatique et non pas sous une forme électrochimique. Sa densité de puissance est considérable (10 fois supérieure à un accumulateur classique). Par contre son contenu énergétique est 10 fois plus petit. Les temps de charge sont très courts et les rendements sont de l'ordre de 90%. Les supercondensateurs actuels qui vont jusqu'à quelques kilos Farads, sont capables de travailler sur un domaine des températures allant de -40 à 70°C. Les tensions de cellule sont très faibles de l'ordre de 2.7 V, mais la mise en série de plusieurs cellules permet d'atteindre des tensions élevées. [Cama04]

II.2.1.3. Modélisation d'un super condensateur

Pour notre application, un banc de supercondensateur est utilisé comme source de stockage d'énergie. Ce banc est associé à un hacheur survolteur afin de réaliser l'étage de tension du bus continu. Comme les équations ci-dessous :

$$\begin{cases} U_{second} = U + r_s \cdot i_s \\ \frac{dU}{dt} = \frac{i_s}{C_0 + K \cdot U} \end{cases}$$

$$i_s = \frac{i_L - U_{second}}{R_f}$$

Pour gérer l'énergie disponible dans les supercondensateurs, un convertisseur est nécessaire. Nous utiliserons un hacheur survolteur (boostconverter) avec une inductance pour lisser le courant traversant les supercondensateurs. Un condensateur de filtrage en amont du hacheur réalise le bus continu et permet de respecter les règles de l'électronique de puissance (liaison entre deux sources de natures différentes). Le convertisseur est réversible en courant pour assurer la charge-décharge des supercondensateurs. [Lhom01]

II.3. Les convertisseurs AC/DC

Ces convertisseurs sont des redresseurs réalisés dans la plupart des cas par des circuits à pont de diodes et capacité de lissage en amont et caractérisés par leurs irréversibilités. Cependant, ce type de redresseurs, malgré qu'ils aient un coût faible et une simplicité de

commande, restent inadaptés à certaines applications notamment celles nécessitant un écoulement de puissance bidirectionnel comme le cas dans une chaîne de traction d'un véhicule hybride série. Par conséquent, d'autres types de redresseurs sont privilégiés dans ce genre d'application et le redresseur à MLI semble la solution la plus adaptée et la plus intéressante en raison de ses nombreux avantages. Ce redresseur puise ses tensions d'alimentation du groupe électrogène [voir Fig. (II.1)]. Dans le présent travail, l'alimentation s'effectuera via un réseau de tensions triphasées [voir Fig. (II.2)].

II.3.1. Le redresseur à MLI

Le redresseur à MLI est réalisé à l'aide de semi conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, ce qui permet un control total du convertisseur et la commutation des interrupteurs selon le besoin. Il peut être mis en application de deux manière : comme redresseur à source de courant, comme redresseur à source de tension et ce dernier et du moins le plus utilisé.

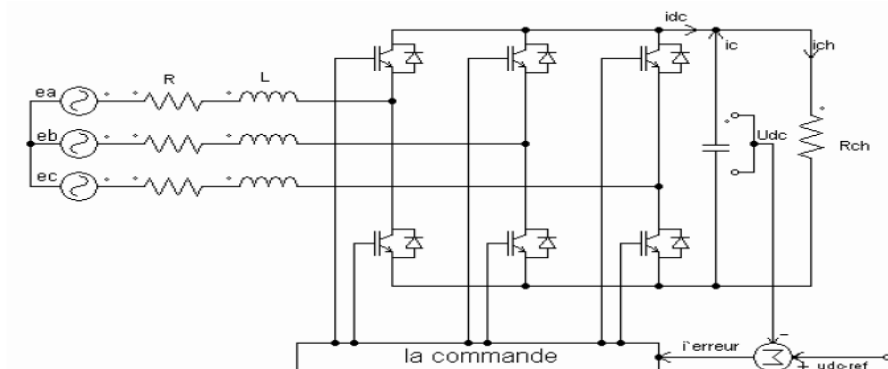


Figure II.7 : Redresseur à MLI

II.3.1.1. Avantage du redresseur à MLI

- La réversibilité : L'écoulement de puissance est bidirectionnel.
- Facteur de puissance élevé.
- Permet le contrôle de la tension du bus continu.
- Réduction des dimensions de la capacité du bus continu.
- Faible distorsion des harmoniques du courant du réseau..

II.3.1.2. Principe de fonctionnement

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure (II.7). Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu U_{dc} est mesurée et

comparée avec une référence U_{dc-ref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu U_{dc} mesurée aux bornes du condensateur C .

Quand le courant i_{ch} est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon. Inversement, quand i_{ch} devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative. La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive. Ce type de redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenues comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source. [Boul05]

II.3.1.3. Différent Commande MLI du Redresseur

Il existe plusieurs types de commandes, dans ce qui suit on donnera un aperçu général sur ces différents types pour ensuite nous focaliser sur la commande sinus triangle utilisées pour notre modèle de convertisseur.

1- MLI à Bande d'hystérésis

C'est une méthode qui ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. Son principe consiste à fixer une amplitude (fourchette ou bande d'hystérésis) et dès que l'erreur entre un signal et sa consigne la dépasse, une commutation des interrupteurs s'effectue.

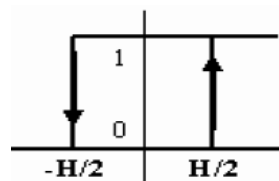
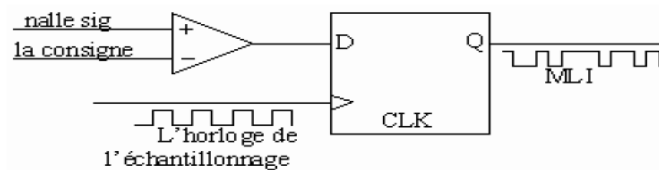


Figure II.8 : Principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.

- L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$.
- Il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (bande d'hystérésis).
- L'erreur varie entre $-H/2$ et $+H/2$, l'interrupteur ne commute pas.

2- MLI à échantillonnage périodique

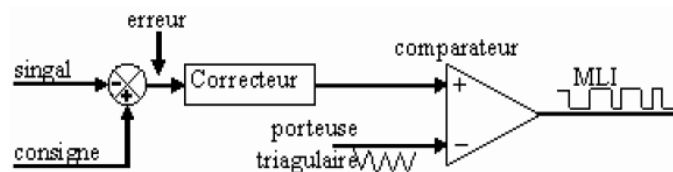
Chaque phase nécessite un comparateur et une bascule D type, la commutation s'effectue durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence constante. La période d'échantillonnage de l'horloge limite le temps minimal entre les commutations, c'est le principal avantage de cette commande, reste que la fréquence de commutation n'est pas clairement définie.



FigureII.9 : MLI à échantillonnage périodique

3- MLI à porteuse triangulaire

Son principe consiste à comparer l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une porteuse triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées.



FigureII.10 : MLI à porteuse triangulaire

4- MLI vectorielle

Pour la MLI vectorielle, les signaux de commande sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras du redresseur en même temps. Les vecteurs à appliquer et le temps d'application de ces derniers sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Cette commande peut également se faire avec une porteuse triangulaire soit : une modulation vectorielle avec porteuse.

II.3.1.4. Modélisation du redresseur à MLI

Le redresseur à MLI connecté à une source de tension triphasée peut être représenté par un schéma unifilaire qui est illustré sur la figure (II.11) suivante :

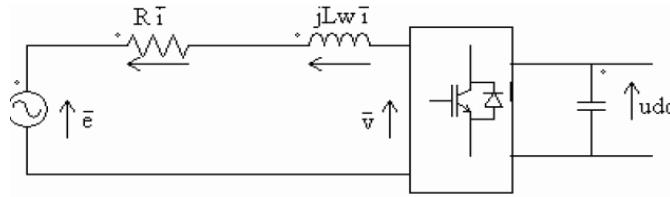


Figure II.11 : Schéma unifilaire d'un redresseur connecté à un réseau

(R,L) représente les paramètres de la ligne, (V) la tension d'entrée du redresseur et (Udc) est la tension du bus continu (tension redressée).[Boul05]

- Les différents états des interrupteurs

Les différents états des interrupteurs sont illustrés dans le tableau (II.1) suivant :

K	S _a	S _b	S _c	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}
0	1	0	0	u _{dc}	0	- u _{dc}
1	1	1	0	0	u _{dc}	- u _{dc}
2	0	1	0	- u _{dc}	u _{dc}	0
3	0	1	1	- u _{dc}	0	u _{dc}
4	0	0	1	0	- u _{dc}	u _{dc}
5	1	0	1	u _{dc}	- u _{dc}	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau II.1 : différents états des interrupteurs

D'une manière générale, on peut écrire alors les équations des tensions d'entrée du redresseur comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = (S_a - S_b) \cdot U_{dc} \\ V_{bc} = (S_b - S_c) \cdot U_{dc} \text{ (II.1)} \\ V_{ca} = (S_c - S_a) \cdot U_{dc} \end{cases}$$

a- Redresseur MLI dans le référentielle triphasé

Pour un système triphasé équilibré sans neutre, les tensions peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut s'écrire :

$$V_n = U_{dc} \cdot (S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n) \quad (\text{II.3})$$

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme suit :

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (\text{II.4})$$

Le courant dans la capacité s'écrit aussi :

$$I_c = I_{dc} - I_{ch} \quad (\text{II.5})$$

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II.6})$$

Où : (I_a, I_b, I_c) : courants de phases a,b,c

(S_a, S_b, S_c) : États des interrupteurs

Donc, côté alternatif du redresseurs, on a

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di_a}{dt} + R \cdot i_a = e_a - U_{dc} \cdot (S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n) = e_a - U_{dc} (S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c)) \\ L \cdot \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b = e_b - U_{dc} \cdot (S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n) = e_b - U_{dc} (S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c)) \\ L \cdot \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_c = e_c - U_{dc} \cdot (S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n) = e_c - U_{dc} (S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c)) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec:

$$\begin{cases} e_a = E_m \cdot \sin(\omega t) \\ e_b = E_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = E_m \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

A partir de ces équations, on peut représenter le schéma

fonctionnel suivant de simulation d'un redresseur à MLI dans le repère triphasé.

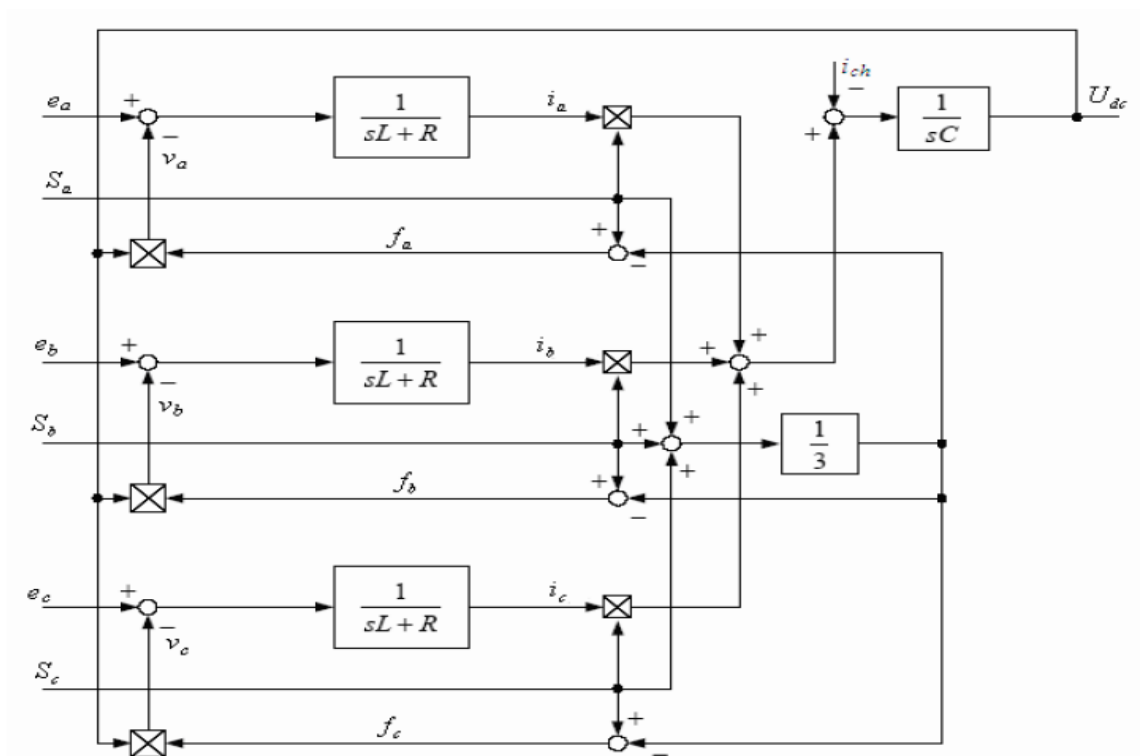


Figure II.12 : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le repère (a,b,c)

b- Redresseur à MLI dans le référentiel fixe $\alpha\beta$

Les équations dans le repère fixe sont obtenues en utilisant les transformations suivantes :

Transformation de coordonnées $\alpha\beta$ -abc :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Transformation de coordonnées abc - $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

On aura alors :

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di_\alpha}{dt} + R \cdot i_\alpha = e_\alpha - (U_{dc} \cdot S_\alpha) \\ L \cdot \frac{di_\beta}{dt} + R \cdot i_\beta = e_\beta - (U_{dc} \cdot S_\beta) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{K=\alpha}^{\beta} S_n \cdot i_n - i_{ch} = \frac{3}{2} (S_\alpha \cdot i_\alpha + S_\beta \cdot i_\beta) - i_{ch}$$

$$\text{Où : } S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}} (2 \cdot S_a - S_b - S_c), S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c)$$

Un schéma fonctionnel dans le repère $\alpha\beta$ est alors présenté dans la figure (II.13) suivante :

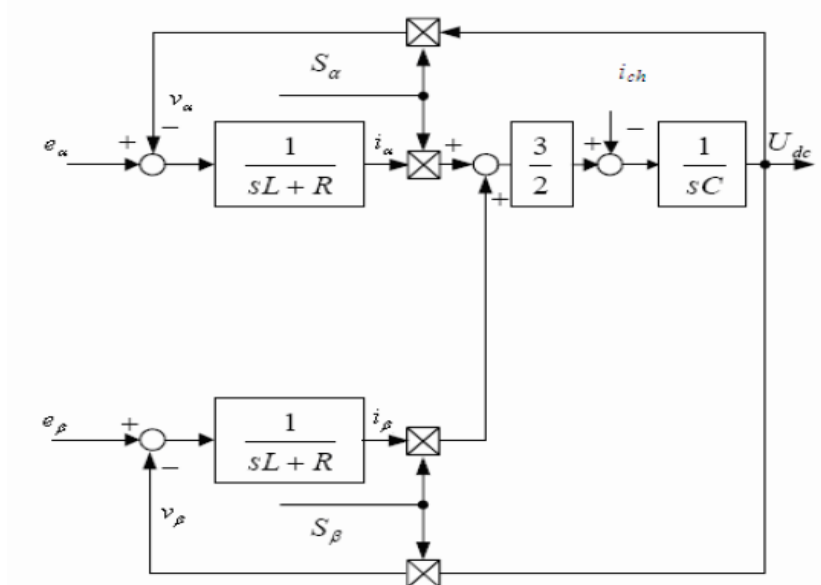


Figure II.13 : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI dans le repère fixe $\alpha\beta$

c- Redresseur à MLI dans le référentiel tournant dq

Les équations dans le référentiel tournant dq sont obtenues à l'aide des transformations suivantes :

Transformation $\alpha\beta$ -dq :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Transformation dq- $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

On aboutira alors aux équations suivantes :

$$\begin{cases} e_d = R \cdot I_d - \omega_r \cdot L_q \cdot I_q + L_d \cdot \frac{d}{dt} (I_d) + V_d \\ e_q = R \cdot I_q + \omega_r \cdot L_d \cdot I_d + L_q \cdot \frac{d}{dt} (I_q) + V_q \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \sum_{K=d}^q S_n \cdot i_n - i_{ch} = \frac{3}{2} (S_d \cdot i_d + S_q \cdot i_q) - i_{ch} \quad (\text{II.16})$$

Où :

$$S_d = S_\alpha \sin(\omega t) + S_\beta \cos(\omega t), S_q = S_\beta \cos(\omega t) - S_\alpha \sin(\omega t)$$

La figure (II.14) représente un schéma fonctionnel dans les repères tournant dq :

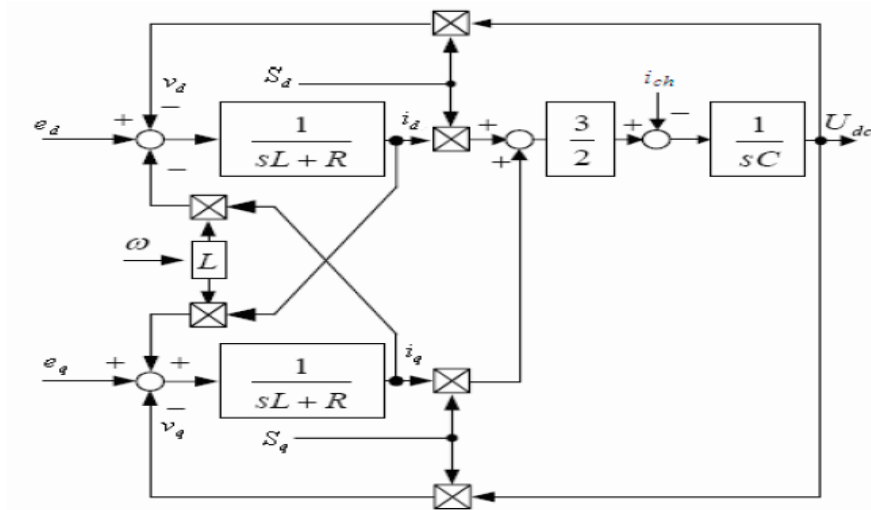


Figure II.14 : Schéma fonctionnel du redresseur à MLI dans le référentiel tournant d-q

II.3.1.5. Méthodes de contrôle du redresseur à MLI

Le contrôle d'un redresseur à MLI revient à dire contrôler la tension du bus continu, pour cela, il existe plusieurs méthodes :

- Le contrôle en courant.
- Le contrôle vectoriel où deux méthodes sont utilisées : La première est la commande à tension orientée (VOC) basée sur la synchronisation par le PLL (Phase Locked Loop) avec une commande dont la définition a été citée dans les méthodes de commande à MLI. La deuxième qui est la commande à flux virtuel orienté (VFOC) basé sur

l'estimation du flux virtuel et où la source est assimilée à une machine alternatif virtuelle.

- Le contrôle direct de puissance (DPC) est une méthode basée sur le contrôle direct du couple, le but est de contrôler directement la puissance active et la puissance réactive dans le redresseur à MLI. Cette méthode exige des comparateurs hystérésis pour les erreurs de puissances.

II.3.2. Simulation d'un redresseur à MLI

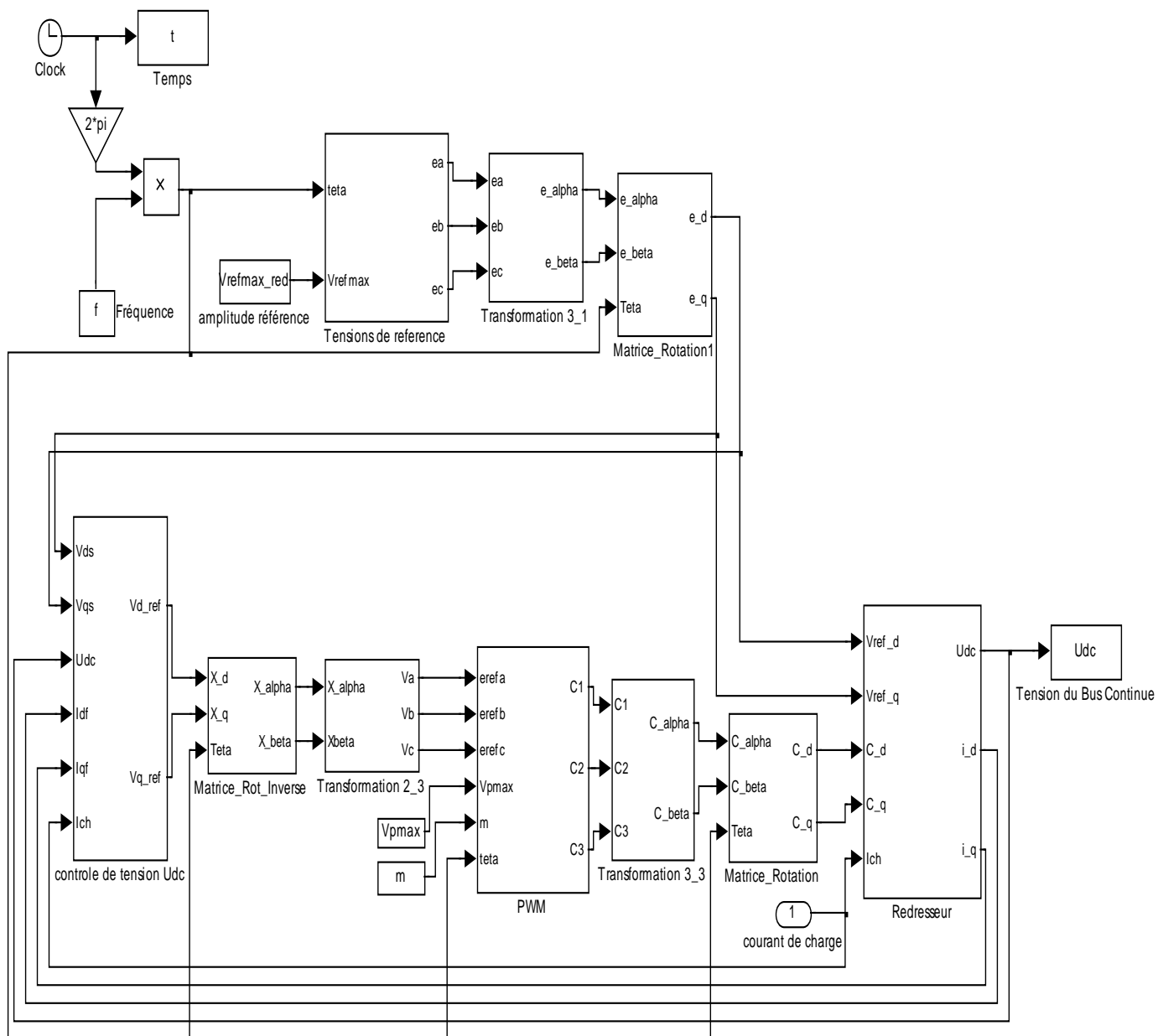


Figure II.15 : schéma bloc de simulation d'un redresseur à MLI

II .3.2.1. Calcul des régulateurs

a- Régulateur de courants

Le schéma fonctionnel de régulation des courants i_d et i_q est donné dans la figure (II.16) suivante

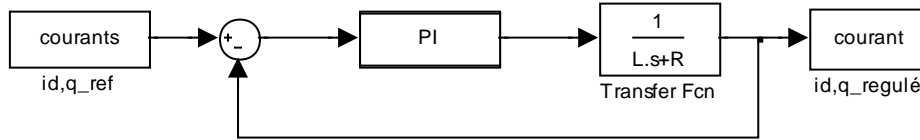


Figure II.16: Schéma fonctionnel de régulation des courant i_d et i_q

Les contrôleurs de courant utilise sont de type PI, les paramètres sont calculés en fonction du temps de réponse et du facteur d'amortissement. [Boul05]

$$\begin{cases} k_{pi} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot L - R \\ k_{ii} = L \cdot \omega_n^2 \end{cases}$$

Où : $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_n \cdot t_{resp}$ depend de temps de repense choisi.

On prend $\omega_n = \omega_c / 5$ pour une régulation interne rapide.

$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c$ Avec: f_c , fréquence de commutation des interrupteurs.

b- Régulateur de tension du bus continue

Le schéma fonctionnel de la boucle de régulation de tension de bus continue est représenté sur la figure (II.17) suivante :

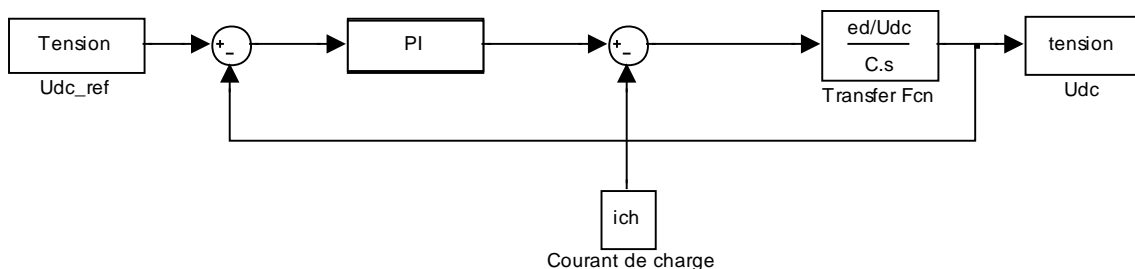


Figure II.17 : schéma fonction de régulation de tension U_{dc}

Selon le temps de réponse et le facteur d'amortissement on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{iv} = \frac{C \cdot w_{nv}^2}{\frac{Em}{U_{dc}} \sqrt{\frac{3}{2}}} \\ k_{pv} = 2 \cdot \frac{C \cdot \xi_v \cdot w_{nv}}{\frac{Em}{U_{dc}} \sqrt{\frac{3}{2}}} \end{array} \right.$$

Où : $w_{nv} = w/6$ et $\xi_v = \frac{\sqrt{2}}{2}$

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$: Avec: f , la fréquence du réseau. [Boul05]

II.3.2.2. Résultats de la simulation

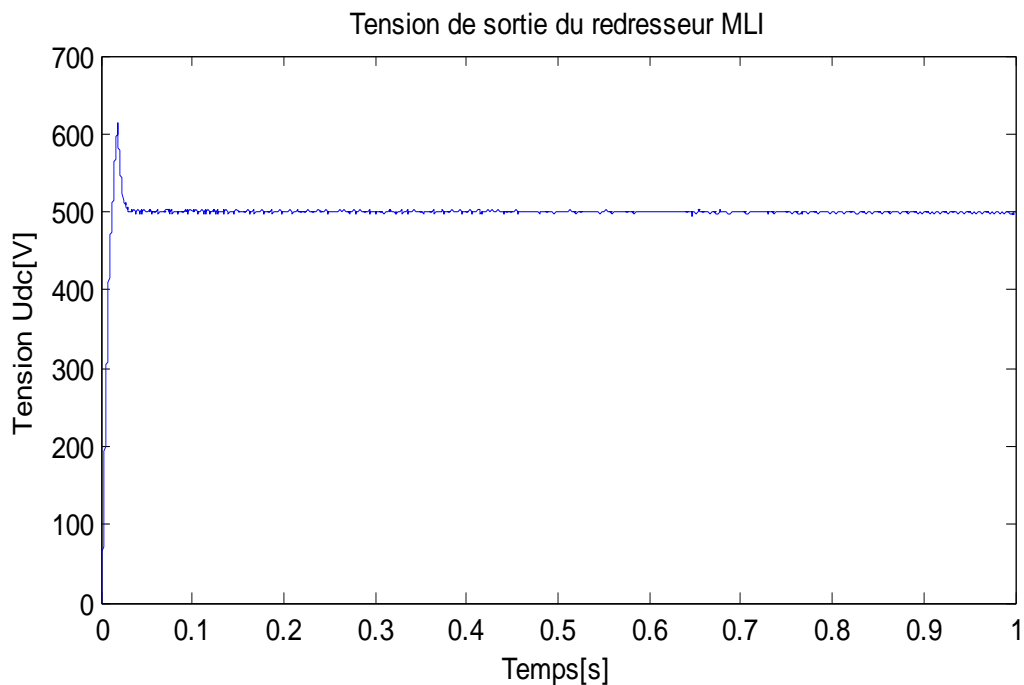


Figure II.18 : Tension de sortie du Redresseur à MLI

La figure (II.18) présente la tension de sortie du redresseur à MLI. L'allure de la courbe est celle d'un système de premier ordre. On remarque que la précision du système est assez correcte malgré un léger pic enregistré entre 0.02 et 0.05 s et sa dynamique est rapide avec un temps de réponse de 0.07 s. Après, la tension est maintenue à la valeur de la consigne qui est de 500 V que l'on utilisera dans notre étude ce qui nous amène à conclure que la commande et les régulateurs utilisés sont adaptés à l'objectif recherché.

II.4. Les convertisseurs (DC/AC)

L'utilisation des convertisseurs (DC/AC) est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique. Utilisé dans plusieurs domaines industriels dont, l'industrie de l'automobile écologique. C'est l'un des sous-systèmes les plus importants dans la configuration d'un véhicule hybride série, objet de notre étude. En effet, en fonctionnement hybride, il assure la liaison entre le bus continu et la machine synchrone de traction et en fonctionnement tout électrique, il assure la liaison entre la batterie et ce même moteur de traction. Son rôle n'est pas que liaison, puisque ce système permet en premier lieu la conversion de l'alternatif vers le continu et en deuxième lieu et c'est son rôle principale : commande de la vitesse du moteur de traction et ce en choisissant l'une des multiples méthodes de contrôle pour ce genre de convertisseur.

II.4.1. L'onduleur à MLI

L'onduleur de tension à MLI assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif, c'est un convertisseur (DC/AC). Il est constitué de trois bras formés d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence de travail, chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires munis de diode montée en antiparallèle. La figure (II.19) illustre la configuration d'un onduleur à MLI associé à une MSAP.

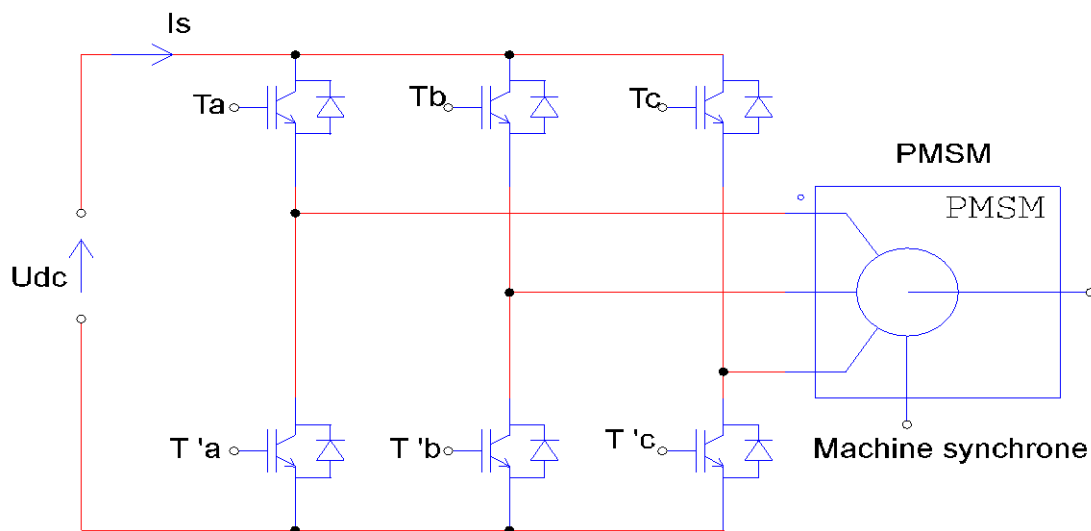


Figure II.19: Configuration d'un onduleur associé a une MSAP.

II.4.1.1. Modulation naturelle (sinus- triangle)

La MLI sinus triangle appelée en anglais (*Pulse Width Modulation PWM*) est utilisée pour générer un signal qui contrôle les interrupteurs. Elle délivre un signal de commande en créneaux, ce signal est généré par l'intersection de deux signaux : signal de référence, généralement sinusoïdal qui est de basse fréquence, et le signal de porteuse qui est de haute fréquence de forme généralement triangulaire d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale.

Caractéristique de la MLI sinus-triangle :

Si le signal de référence est sinusoïdal, la modulation est caractérisée par les paramètres suivants:

-L'indice de modulation m : C'est le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur celle du signal modulé f_m :

$$m = \frac{f_p}{f_m}$$

-Le coefficient de réglage r : C'est le rapport de l'amplitude de la modulante V_m par celle de la porteuse V_p :

$$r = \frac{V_m}{V_p}$$

II.4.1.2. Choix du rapport de modulation

Suivant la valeur de m , trois types de commande MLI sinus-triangle vont être distingués :

- La commande asynchrone : la période du signal triangle est fixe, m varie et il est inversement proportionnel à la fréquence du fondamental.
- La commande synchrone : le nombre de triangles par sinusoïde de référence est constant, m est fixé, f_p varie. Cette stratégie introduit moins d'harmoniques que la stratégie asynchrone, mais elle est plus contraignante à implanter car il faut générer un signal triangle de fréquence variable.

- *La commande hybride*: il s'agit d'une commande synchrone avec une borne maximale imposée sur f_p . La commande est ainsi synchrone pour les faibles vitesses de la machine et asynchrone pour les vitesses élevées.[Njan06]

La figure (II.20) représente l'allure des signaux de commande MLI sinus triangle.

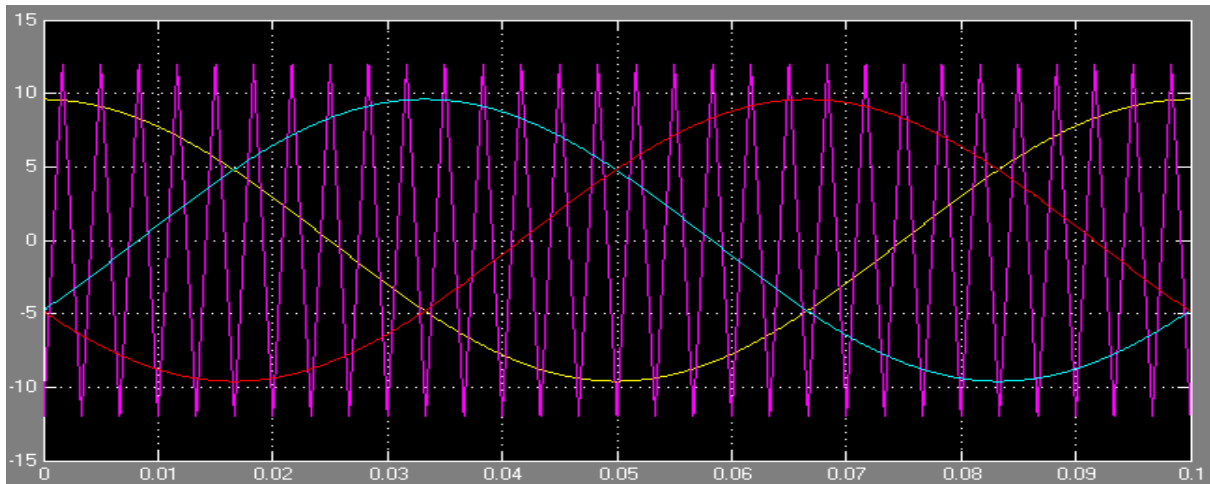


Figure II.20: Allure de la porteuse et du signal de référence d'une MLI sinus triangle.

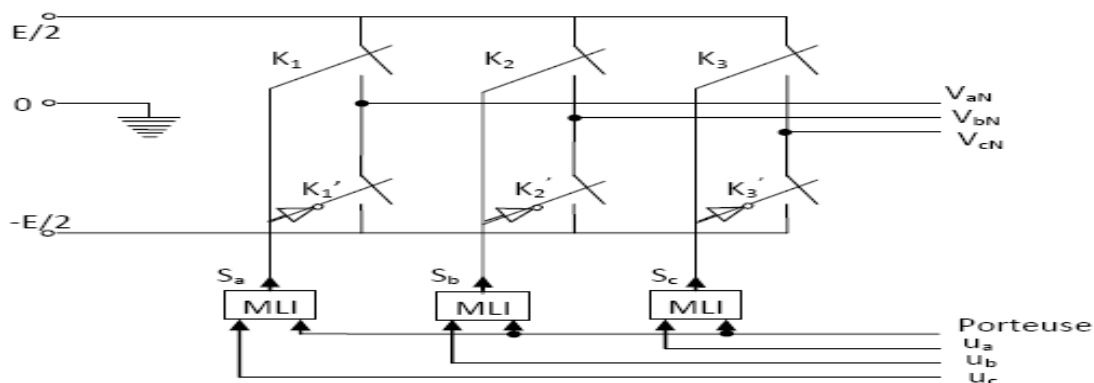


Figure II.21 : Schéma l'onduleur commandé avec une MLI sinus triangle

II.4.1.3. Modélisation de l'onduleur à MLI[Aoui07]

$$\text{Les tensions aux bornes de l'onduleur : } \begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \text{ (II.17)} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases}$$

Les tensions (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) forment un système de tension triphasées équilibrées, donc :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

$$(II.18) \begin{cases} V_{an} = V_{a0} - V_{n0} \\ V_{bn} = V_{b0} - V_{n0} \\ V_{cn} = V_{c0} - V_{n0} \end{cases}$$

$$\rightarrow V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 3 \cdot V_{n0} + V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} \quad (II.19)$$

On déduit

$$V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (II.20)$$

A partir des équations

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Dans une branche d'onduleur, un interrupteur statique (k) peut prendre la valeur +1 ou -1 selon les conditions suivantes :

$$V_{aref} \geq V_p \rightarrow S_a = 1 \text{ sinon } S_a = -1$$

$$V_{bref} \geq V_p \rightarrow S_b = 1 \text{ sinon } S_b = -1$$

$$V_{cref} \geq V_p \rightarrow S_c = 1 \text{ sinon } S_c = -1$$

Avec :

V_{abcref} : Amplitude de référence.

V_p : Amplitude de porteuse.

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} : \text{Matrice de connexion} \quad (II.22)$$

II.4.2. Simulation de l'onduleur à MLI

Les figures suivantes représentent :

- Figure (II.22) : schéma bloc détaillé de l'onduleur à MLI sinus triangle
- Figure (II.23) : schéma bloc fonctionnel de l'onduleur à MLI sinus triangle

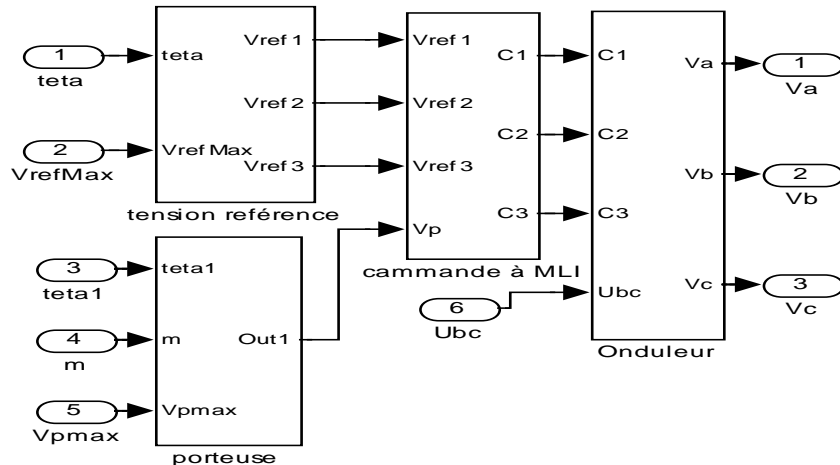


Figure II.22: schéma block détaillé de l'onduleur à MLI sinus triangle

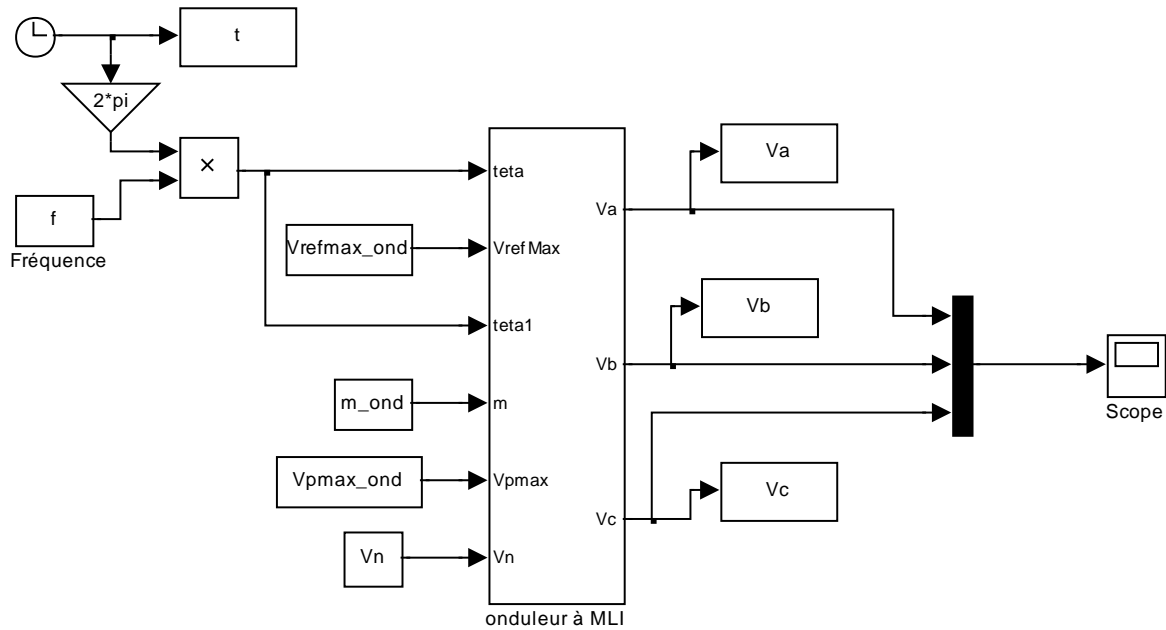


Figure II.23 : schéma block fonctionnel de l'onduleur à MLI sinus triangle

II.4.2. 1. Résultats de la simulation

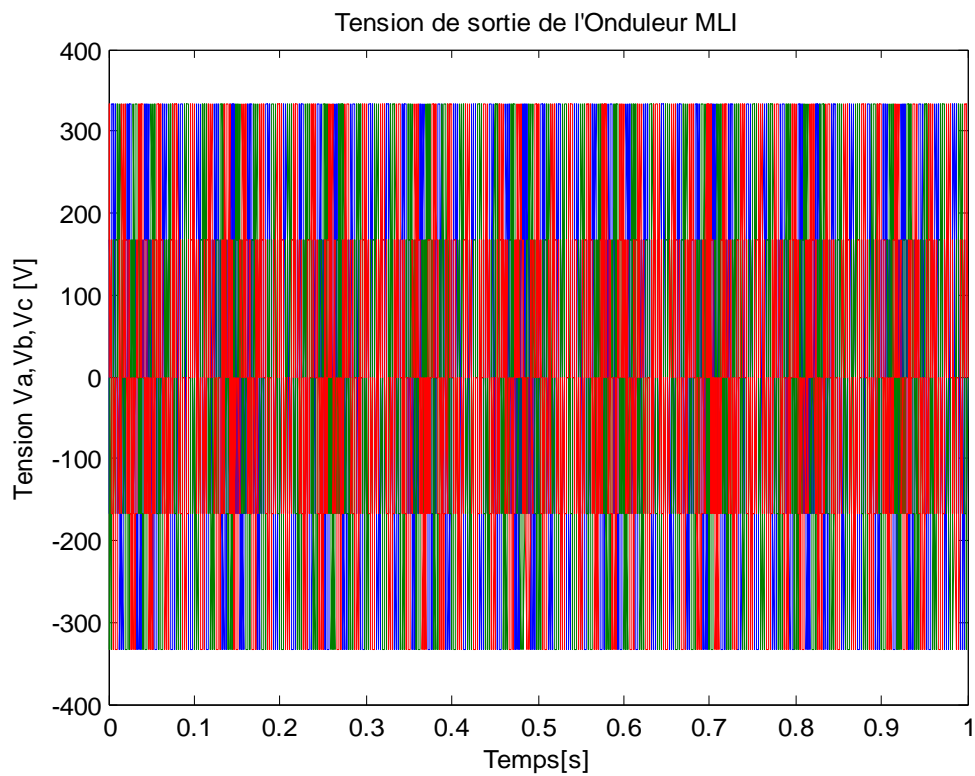


Figure II.24 : Tension de sortie de l'Onduleur

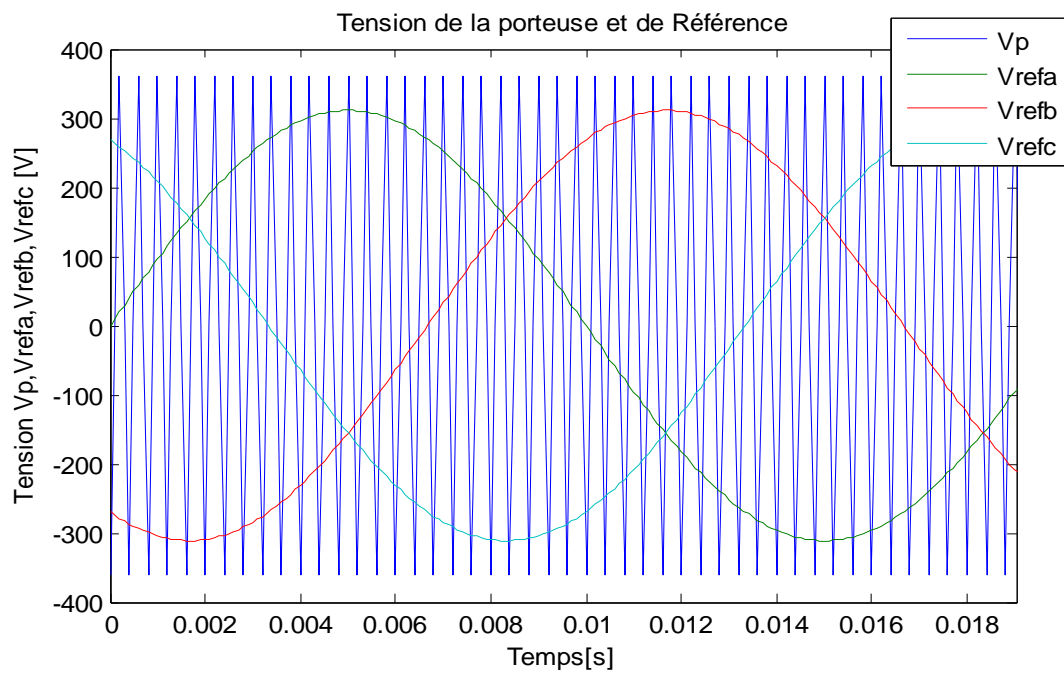


Figure II.25 : Allure des Tension de la porteuse et de référence

La figure (II.24) présente les tensions à la sortie des bras de l'onduleur qui constituent l'alimentation de la machine de traction.

La figure (II.25) montre les tensions de la commande sinus triangle avec un système de tension triphasée qui représente les tensions de référence et la tension triangulaire qui est la porteuse. Ces résultats confirment que la technique MLI utilisée est satisfaisante pour la commande de l'onduleur.

II.5. La machines synchrones à aimant permanent

Au début de ce 21^{ème} siècle, la machine synchrone à aimant permanent semble promise à un bel avenir. Grâce aux aimants permanents qui produisent une densité magnétique élevée, on peut construire des MSAP plus légères et plus compactes que des machines asynchrones de même puissance. Présentant des couples, des puissances massives et des rendements élevés, elles ont pu trouver leurs essors en traction électrique par le développement des aimants à terre rare. Cependant leurs prix de revient restent plus élevés que celui des machines asynchrones. [Daan12]

II.5.1. Les aimants permanents

Ce sont des matériaux qui conservent à la température d'utilisation leurs aimantations, leurs propriétés magnétiques sont tout d'abord déterminées par rapport aux composants qui les constituent et aussi à leurs microstructures liées aux procédés de fabrication. Il existe trois types d'aimants permanents :

- Les AlNiCo

C'est une abréviation des trois composants de cet aimant et qui sont : l'aluminium, le nickel et le cobalt. Ces aimants se caractérisent par une induction rémanente élevée ($B_r=1.2T$) et un champ coercitif faible ($H_c=150kA/m$).

- Les ferrites

Ces matériaux sont caractérisés par un champ coercitif élevé ($H_c=250kA/m$) et une induction rémanente relativement basse ($B_r=0.3T$). Ils ont été développés après les AlNiCo et c'est le type d'aimants le plus utilisé.

- Les aimants à terre rare [08]

Ils sont composés essentiellement de Samarium et de Cobalt et possèdent un bon champ coercitif et une induction rémanente élevée. Par conséquent, ils fournissent à la machine de

très bonnes performances, néanmoins le coût de ces aimants reste élevé. La figure (II.26) montre les caractéristiques des aimants. [Aoui07]

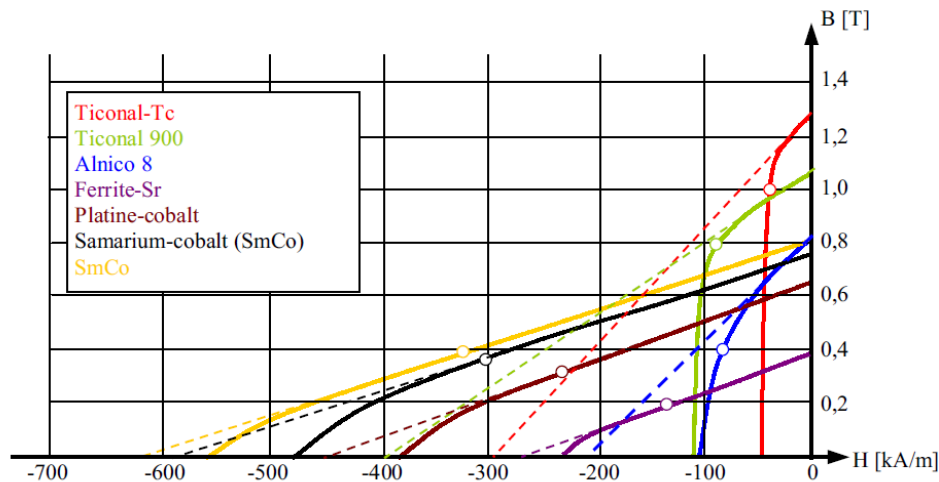
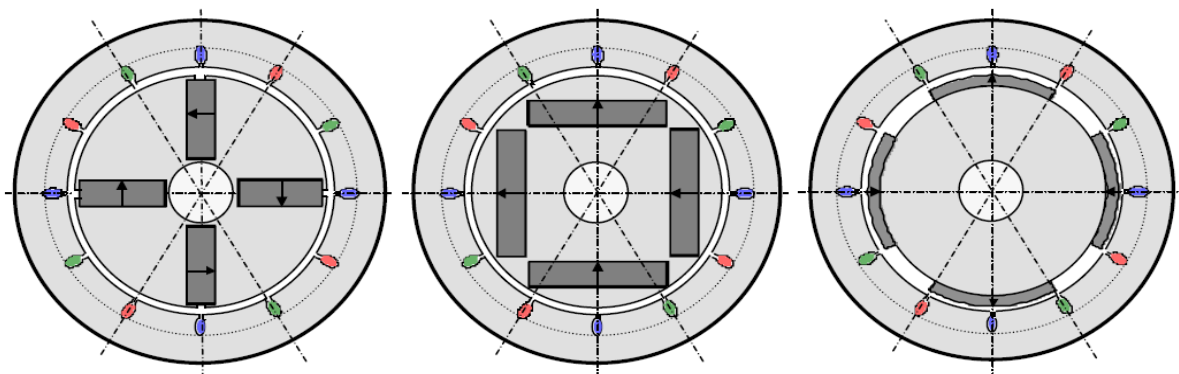


Figure II.26 : caractéristique des différents types d'aimants

II.5.2. Différents Structures des MSAP

Les structures des MSAP's sont classés suivant la disposition des aimants permanent sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial et à flux axial. Des exemples de structures sont illustrés dans la figure (II.27).



Machine à concentration de flux Machine à aimant enterré machine à aimant collés

Figure II.27: différents structures des MSAP's

II.5.3. Principe de fonctionnement d'une MSAP

Le stator est alimenté par une tension triphasée équilibrée créant dans l'entrefer un champ tournant, ce dernier a tendance à attirer le rotor, qui est constitué d'aimants permanent produisant un champ tournant d'induction. Les champs d'induction créés par le rotor et le stator ont tendance à s'aligner et un couple d'origine électromagnétique se crée.

Le rotor se met à tourner à une vitesse angulaire (Ω), cette dernière est liée au nombre de paires de pôles (p) et à la pulsation (ω) qui est égale à celle du champ tournant, ce qui justifie la nomination de machine synchrone.[Aoui07]

II.5.4. Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

La modélisation consiste à mettre en équations les caractéristiques de la machine, ces équations sont en générale non linéaire, cette non linéarité est due aux inductances et coefficients dynamique dépendant de la position du rotor et donc du temps. Afin de diminuer la complexité de ce modèle dynamique, un changement de variable est souvent utilisé, avec la réduction du nombre de variable et l'élimination de la position du rotor dans les coefficients des équations différentielles. Dans ce cas les conditions du régime permanent peuvent être déterminées plus facilement et l'analyse de la stabilité se fait plus aisément, ainsi que la commande.[Aoui07]

II.5.4.1. Les hypothèses

L'étude du fonctionnement de la machine s'avère délicate et complexe à cause de la formulation mathématique non linéaire et complexe de certains phénomènes (saturation, courant de Foucault, hystérésis ... etc) d'où la nécessité de les négliger en adoptant des hypothèses simplificatrices :

- ✓ Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté. Donc cela permet de négliger les courants de Foucault.
- ✓ La distribution de la f.e.m est sinusoïdale, le long de l'entrefer.
- ✓ Le système électrique d'alimentation est assimilé à une source triphasée délivrant des tensions symétriques et équilibré.
- ✓ La machine est considérée comme une charge équilibrée.
- ✓ La densité du courant dans les sections des conducteurs est uniforme.
- ✓ Les inductances propres sont constantes.
- ✓ Les flux sont additifs

II.5.4.2. Convention

- ✓ Une f.é.m positive fait circuler un courant positif.
- ✓ Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.

✓ Le sens positif des angles et de la vitesse est dans le sens trigonométrique.

II.5.4.3. Modélisation de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

a- Repère statorique

Expression des tensions statoriques :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s]^T \quad (\text{II.23})$$

Expression des flux statoriques :

$$[\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_{sf}]^T \quad (\text{II.24})$$

Avec:

$[V_s] = [V_a V_b V_c]^T$: Vecteur tensions statoriques

$[i_s] = [i_a i_b i_c]^T$: Vecteur courants statoriques (II.25)

$[\phi_s] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^T$: Vecteur flux statorique

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$: Matrice Résistance du stator

$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix}$: Matrice Inductance du stator (II.26)

b- Repère rotorique

$[\phi_{sf}] = [\phi_{af} \phi_{bf} \phi_{cf}]^T$: Vecteur flux créé par les aimants permanent (II.27)

L'étude analytique des comportements de ces équations est complexe vue le nombre de variables et de coefficients. Afin de faciliter cette étude, des transformations mathématiques sont faites sur ces équations. L'une de ces transformations est celle de PARK qu'on utilisera dans notre modélisation.

1- Transformation de Park

$$[T]=P(\theta)=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix}\quad (II.28)$$

$P(\theta)$ est appelé la matrice de Park, le coefficient $2/3$ a été choisi de façon à aboutir aux relations les plus simples entre les valeurs numériques associées aux systèmes d'axe (d_q et abc), des courants, des tensions et des flux. Ce coefficient conduit notamment à des relations simples quand on travaille en grandeurs réduites. Cette transformation ou matrice de Park admet une matrice inverse.

2- Transformation inverse de Park

$$[T]^{-1}=[P(\theta)]^{-1}=\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) & 1\end{bmatrix}\quad (II.29)$$

Certains auteurs utilisent plutôt les coefficients $\sqrt{2}/3$ ou $1/\sqrt{2}$ pour rendre la transformation orthonormée.

3- Interprétation physique de la transformation de Park

La transformation de Park est la substitution aux enroulements a,b,c dont les conducteurs et les axes magnétiques sont immobile par rapport au stator, de deux enroulements d,q dont les axes magnétiques sont solidaire du rotor et tournent avec lui. Cependant les conducteurs constituant ces nouveaux enroulements doivent être considérés comme immobiles. Les conducteurs d,q sont analogue à l'induit d'une machine à courant continu (induit fixe, inducteur tournant). La figure suivante montre les axes de la machine dans le repère (a,b,c) et les axes de la machine dans le repère (d,q) après avoir effectué une transformation de Park.

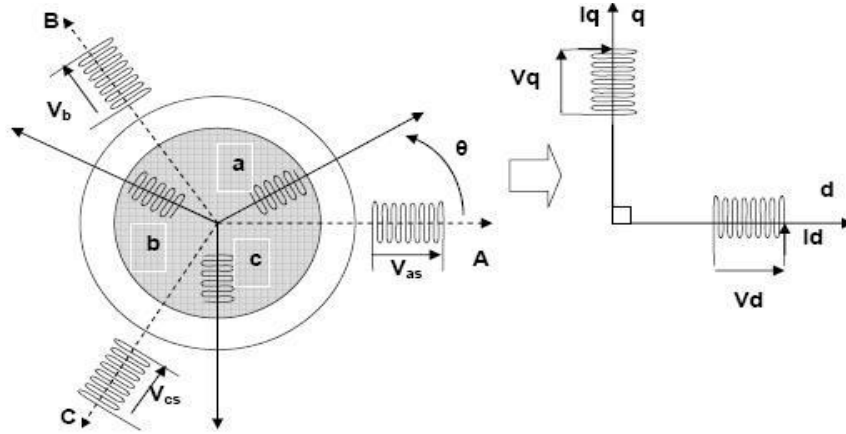


Figure II.28: Représentation de la transformation de Park

II.5.4.3.1. Equations de la machine dans les axes d-q

➤ Equations électriques

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d - w_r \cdot \phi_q + \frac{d}{dt} (\phi_d) \\ V_q = R_s \cdot I_q + w_r \cdot \phi_d + \frac{d}{dt} (\phi_q) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

➤ Equations magnétiques

$$\begin{cases} (\phi_d) = L_d \cdot I_d + \phi_f \\ (\phi_q) = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En remplaçons ϕ_d et ϕ_q par leur expression (2.31) dans (2.30) on aura :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d - w_r \cdot L_q \cdot I_q + L_d \cdot \frac{d}{dt} (I_d) \\ V_q = R_s \cdot I_q + w_r \cdot L_d \cdot I_d + L_q \cdot \frac{d}{dt} (I_q) + w_r \cdot \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

En appliquant la transformation de LAPLACE à l'équation précédente on trouve :

$$\begin{cases} V_d(S) = (R_s + SL_d) \cdot I_d(S) - w_r(S) \cdot L_q \cdot I_q(S) \\ V_q(S) = (R_s + SL_q) \cdot I_q(S) - w_r(S) \cdot L_d \cdot I_d(S) + w_r(S) \cdot \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Avec S : Operateur de LAPLACE

Sous forme matricielle on peut écrire

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + SL_d) - w_r \cdot L_q \\ w_r \cdot L_d (R_s + SL_q) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_r \cdot \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

➤ Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique dans le référentielle de PARK s'écrit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_d \cdot I_q - \phi_q \cdot I_d) \quad (\text{II.35})$$

En remplaçant l'équation (2.31) dans (2.36) l'expression du couple électromagnétique

$$\text{devient : } C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + \phi_q \cdot I_q] \quad (\text{II.36})$$

On note :

$\phi_q \cdot I_q$: Le couple électromagnétique d'une machine à pole lisse.

$(L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q$: Couple supplémentaire du a la saillance du rotor.

➤ Equation mécanique

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dx} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (\text{II.37})$$

Avec :

J : Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m²)

f_r : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad)

C_r : Couple résistant

C_{em} : Couple électromagnétique

II.5.5. Autopilotage de la machine asynchrone

L'autopilotage du moteur synchrone consiste à respecter le synchronisme qui existe entre le champ statorique et le champ rotorique. Pour cela, il faut asservir la position de la

F.m.mstatorique et celle de la f.m.mrotorique, sans cela le moteur synchrone ne démarre pas. Afin de respecter ce synchronisme, on alimente notre moteur par une source de tension à fréquence variable (onduleur de tension), cette dernière est imposée par le moteur lui-même en agissant sur le circuit de commande des interrupteurs de l'onduleur. [Aoui7]

II.5.6. Stratégie de commande de la machine synchrone à aimants permanents

Ils existent plusieurs stratégies de commande de la MSAP. Le développement des nouvelles technologies des semi-conducteurs et des convertisseurs statiques a permis une meilleure maîtrise de la conversion d'énergie aussi, les moyens de calcul ont évolué et de nouveaux algorithmes assurant un découplage de flux et de couple sont appliqués dans les machines à courant alternatif en régime transitoire et en régime permanent. Dans ce qui suit on s'intéressera à deux types de commande pour notre modèle de MSAP qui sont la commande vectorielle et la commande directe avec un onduleur à MLI sinus triangle.

II.5.6.1. Commande de la MSAP via un Onduleur de tension

Les grandeurs de sortie de la commande représentent les tensions ou les courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence et à tension continue fixe. Le réglage est effectué par les durées de fermeture et d'ouverture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement. Cette commande présente deux avantages majeurs :

- Repousser vers les fréquences plus élevées, les harmoniques de la tension, ce qui facilite le filtrage.
- Elle permet aussi de faire varier le fondamental de la tension désiré.

II.5.6.2. Commande vectorielle d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents

Appelée aussi commande par orientation de flux ou VOC (Field Oriented Control). Cette commande permet d'assimiler le comportement de la machine à aimant permanent à une machine à courant continu à excitation séparée. Où la force magnétomotrice de l'induit établie un angle de 90° avec l'axe du flux inducteur et ceci quelque soit la vitesse. La commande vectorielle contrôle donc les courants des phases statoriques en fonction du module et de

l'angle désiré pour s'assurer que ceux-ci soient sinusoïdaux et toujours en quadrature avec le flux statoriques.

Dans une machine à aimant permanent, le module du flux rotorique est fixe et le module des courants statoriques est fixé selon le couple désiré, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le courant générant le couple. Ainsi, nous obtenons un modèle de la machine où le flux et le couple électromagnétique sont découplés de sorte à ce que l'on puisse agir sur ce dernier sans influencer sur le Flux, puisque le couple ne dépend que du courant (I_q). Cela va permettre l'obtention des performances considérables relatives à la réponse du système en régime dynamique semblable à celle des machines à courant continu. [Abde09]

II.5.6.2.1. Principe de la commande vectorielle

La commande par flux orienté consiste à orienter le courant suivant l'axe (q) ce qui permet de contrôler le couple par une seule composante en quadrature (I_q). Le maintien du courant statorique en quadrature avec le flux inducteur donne un couple maximal et la régulation de la vitesse s'effectue alors par le courant (I_q) via la tension (V_q) et la composante directe des courants statorique est égale à zéro ($I_{drf} = 0$) ce qui permet d'annuler la puissance réactive et les pertes associées et de travailler avec un facteur de puissance unitaire. A partir de là le couple est donné alors par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \phi_f \cdot I_q \quad (\text{II.38})$$

En imposant des tensions (V_d), (V_q) et cela en introduisant des courants de références (I_{qref}) et (I_{dref}) nous avons obtenu à l'aide des régulateurs le schéma bloc de la figure (II.29) qui représente la commande vectorielle. [Abde09]

II.5.7. Paramètres de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

Dans un véhicule électrique hybride série, la traction est intégralement assurée par la machine électrique, cette dernière est une machine synchrone à aimants permanents pour notre modèle a une puissance de 100 kW, ses paramètres internes sont illustrés dans le tableau (II.2) suivant :

Paramètre	Valeur
Résistance statorique	0.05Ω

Inductance sur l'axe q	0.65mH
Inductance sur l'axe d	0.65mH
Flux induit des aimants	0.2 Wb
Inertie	0.1 kg. m ²
Nombre de paires de pôles	3
Coefficient de friction	0.005
Puissance Max	100kW

Tableau II.2 : Paramètres de la MSAP de traction. [Aouz16]

II.5.8. Simulation de la commande vectorielle

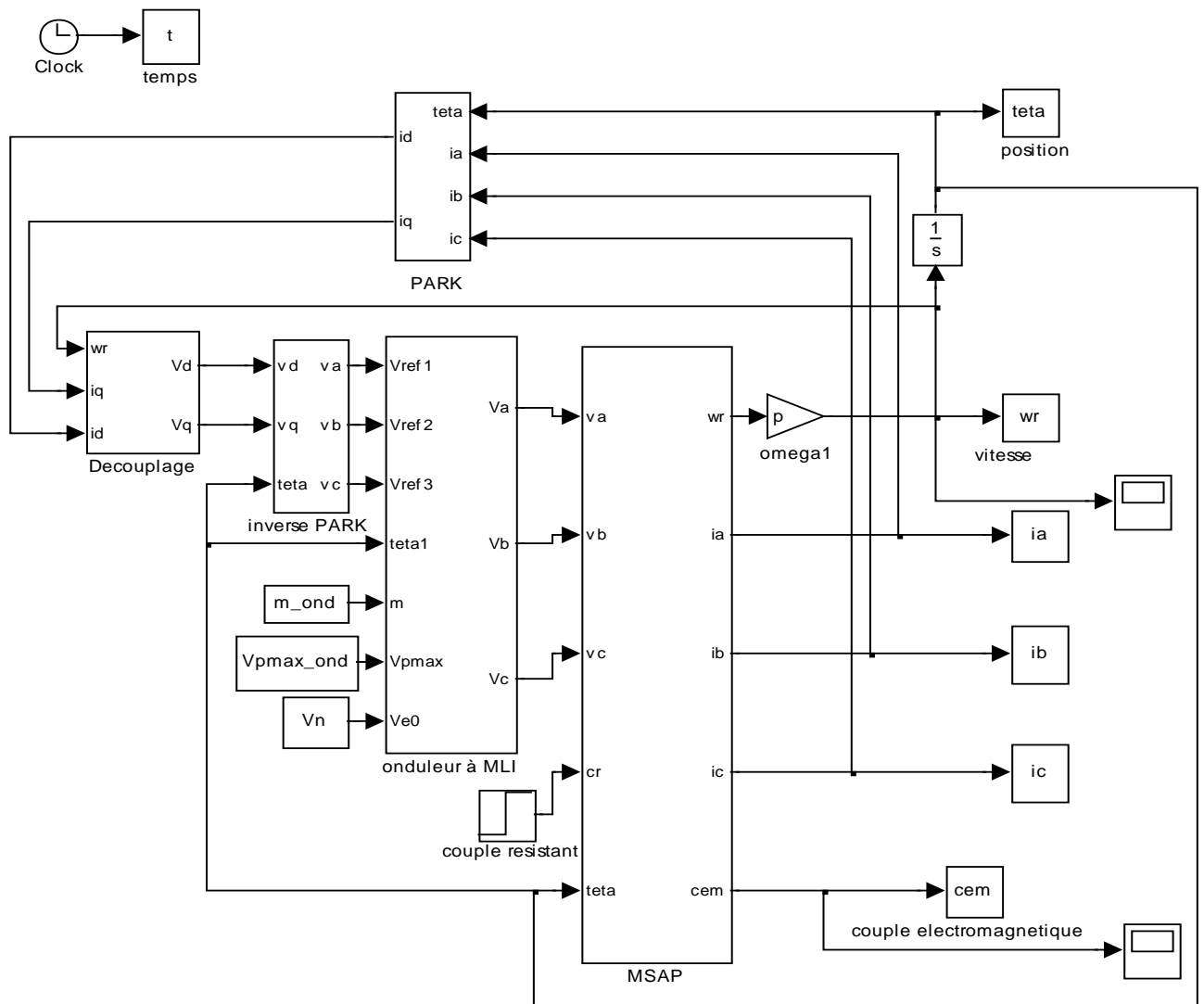


Figure II.29 : schéma de simulation de la commande vectorielle

II.5.8.1. Calcul des régulateurs PI

Les régulateurs utilisés sont de type PI pour la régulation des courants et la régulation de vitesse.

a- Régulateur de vitesse

La figure (II.30) suivante illustre le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.

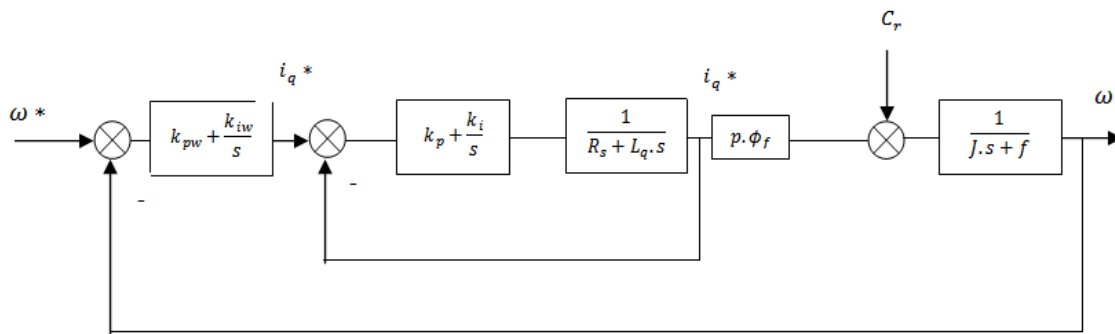


Figure II.30 : Schéma fonctionnel de régulation de vitesse

La fonction de transfert est donnée par :

$$G(p) = \frac{1 + \tau \cdot s}{1 + \tau \cdot s \frac{J}{k_{iw}} \cdot s^2} \quad (\text{II. 39})$$

Avec :

$$\tau = \frac{k_{pw}}{k_{iw}}$$

Sachant que la fonction de transfert d'un système de second ordre est :

$$F(p) = \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{w_0} \cdot s + \frac{1}{w_0^2} \cdot s^2} \quad (\text{II. 40})$$

Par analogie, les paramètres du régulateur PI sont :

$$\frac{J}{k_{iw}} = w_0, \tau = \frac{2\xi}{w_0}$$

Pour un amortissement critique

$$\begin{cases} k_{iw} = \frac{4J}{\tau^2} \\ k_{pw} = k_{iw} \cdot \tau \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

τ : Constante de temps électrique

b- Régulateur de courant

La figure (II.31) suivante représente le schéma fonctionnel de régulation du courant i_d .

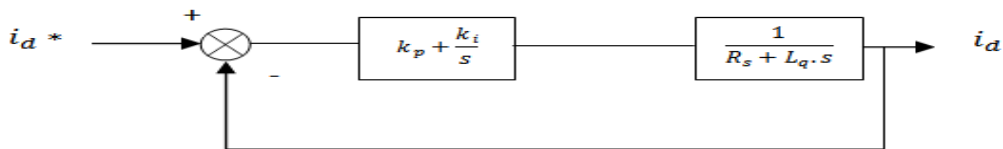


Figure 2.31 : Schéma fonctionnel de régulation de courant i_d

La fonction de transfert de ce système est du 1^{er} ordre, il est donné par :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (\text{II.42})$$

Avec $\tau = \frac{R_s}{L_d}$: Constante de temps électrique.

$$t_{\text{rep}} = 3 \cdot \tau .$$

Avec t_{rep} : Le temps de réponse.

$$\begin{cases} k_p = 3 \cdot \frac{L_d}{t_{\text{rep}}} \\ k_i = 3 \cdot \frac{R_s}{t_{\text{rep}}} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Sachant que

- le schéma fonctionnel du courant i_q est le même que celui présenté sur la figure (II.31) avec comme inductance L_q
- que la machine utilisée est à pôles saillants et de ce fait : $L_q = L_d$

On déduit alors que : Les paramètres du régulateur de courant i_q sont égale au paramètres du régulateur i_d . [Aouz16]

II.5.8.2. Résultats de la simulation

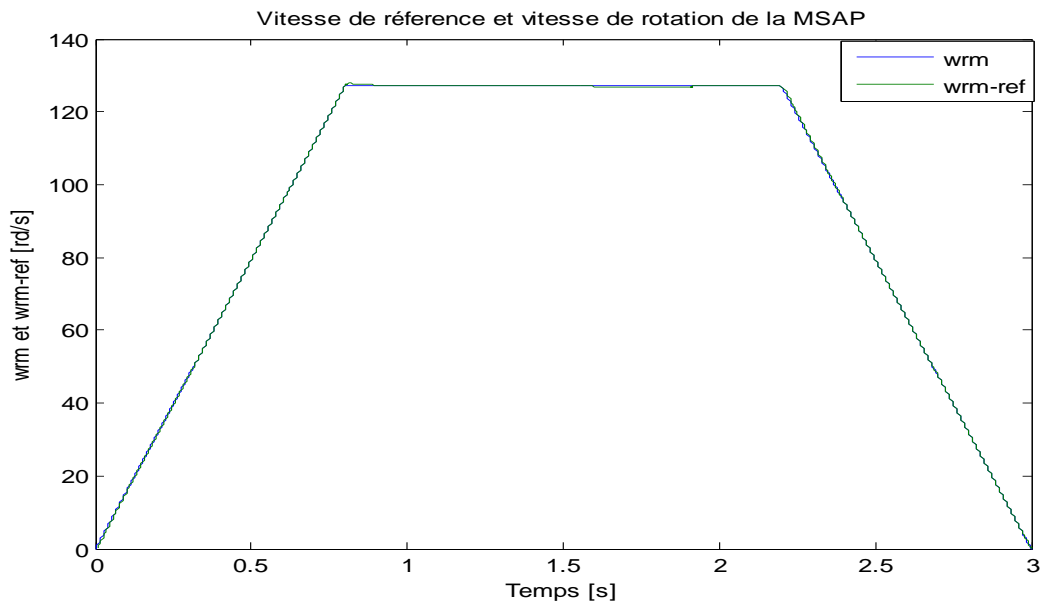


Figure II .32: Allure de la référence de vitesse, la vitesse de rotation de la MSAP.

Les figure (II .32) présente l'allure de la vitesse de référence (wrm-ref) et la vitesse de rotation (wr) de la MSAP elle montre que la vitesse de rotation de la MSAP suit la vitesse de référence imposée de ce fait on peut dire que la régulation utilisée est adaptée à cette étude

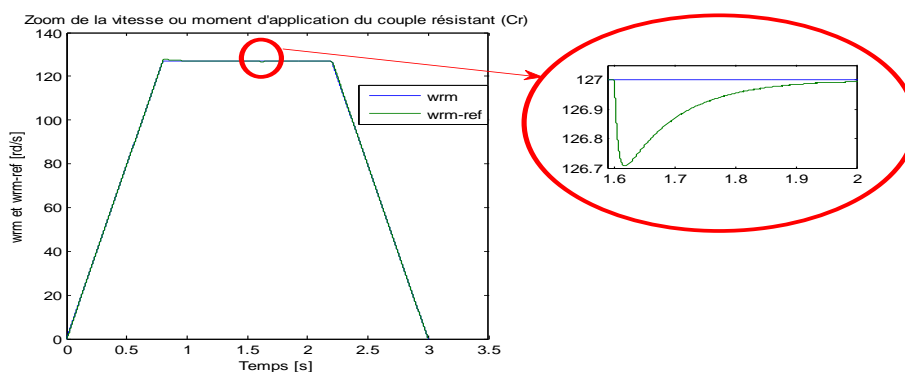


Figure II .33: Zoom sur la vitesse et sa référence à l' instant où le couple est appliqué

La figure (II .33) présente un zoom sur l'allure de la vitesse de la MSAP. Un couple résistant est appliqué à $t=1.6s$, il montre l'influence de ce dernier sur la vitesse de la machine. En effet, la vitesse chute brusquement cette instant pour ensuite, reprendre la valeur de référence grâce au système de régulation de vitesse établie pour cette commande.

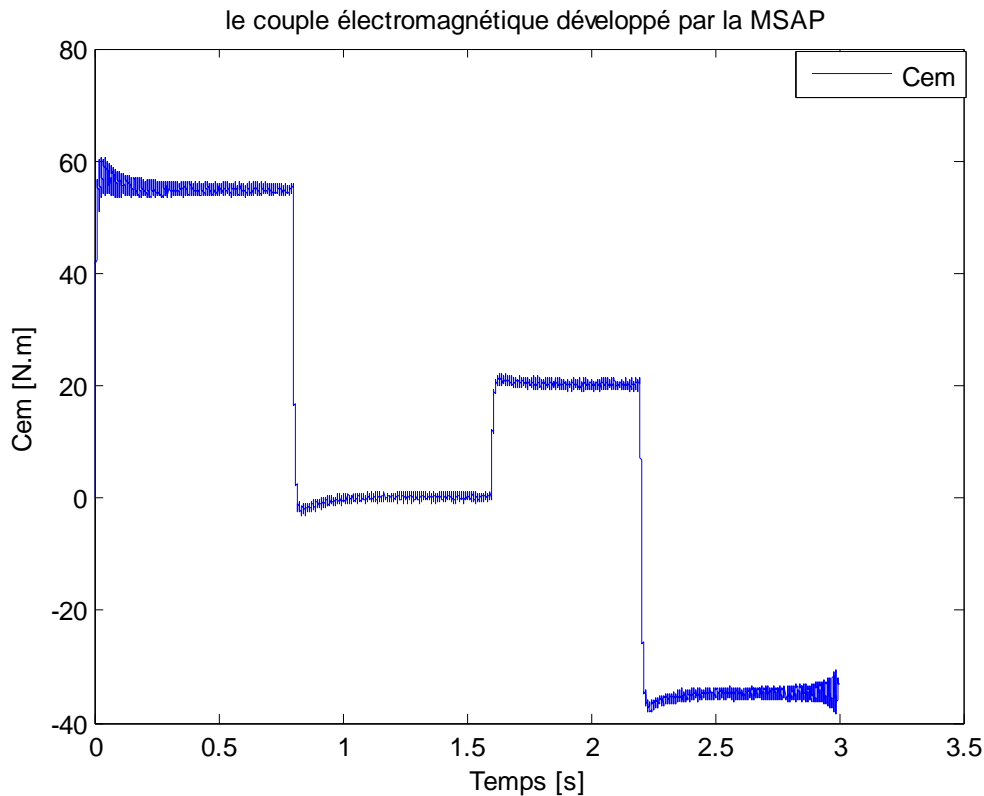


Figure II .34: Allure du couple électromagnétique développé par la MSAP

La figure (II .34) donne l'allure du couple électromagnétique développé par la MSAP pour la référence de vitesse imposée et également l'échelon du couple résistant ($C_r=20$ N.m) imposé à $t=1.6s$. A cette instant, on remarque une brusque augmentation du couple développé et ce à fin de vaincre ce couple de charge. les variation du couple au instant $t=1.8s$ et $t=2.3s$ sont du au changement du régime de vitesse (accélération et décélération).

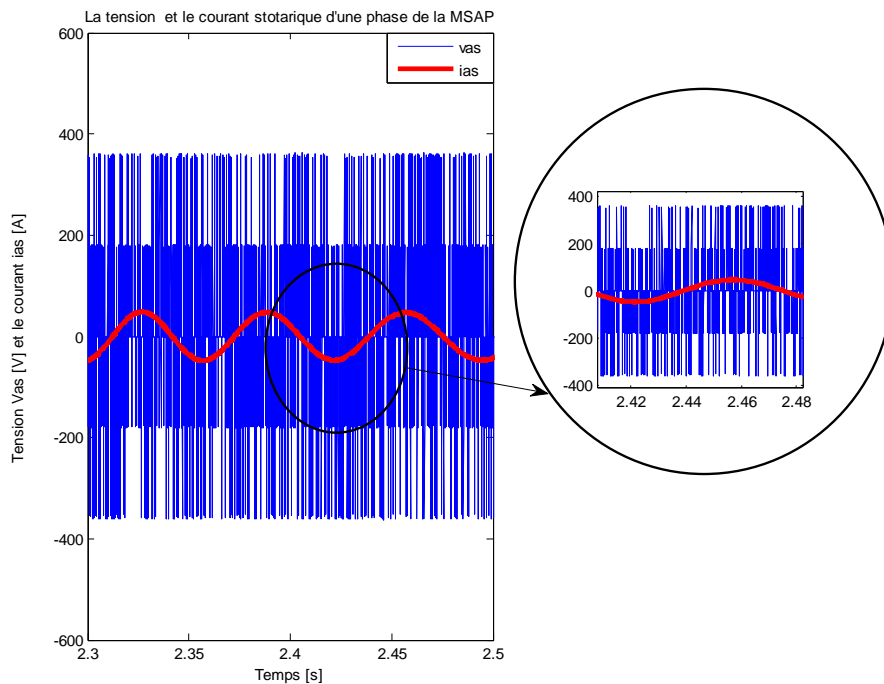


Figure II .35 : Tension et courant statorique de la MSAP et zoom sur l'allure

La figure (II .35) présente la tension et le courant d'une phase statorique de la MSAP, elle montre un déphasage nul ce qui résulte de la stratégie de commande vectorielle utilisé et la régulation effectué dans .ce résultat implique un facteur de puissance unitaire.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude des éléments d'une chaîne de traction d'un véhicule hybride série séparément en donnant les généralités, les différents type de commende et la modélisation de chaque 'un d'eux .ensuite un choix de commande a été établie pour chaque élément pour au final être simuler sous Matlab Simulink.

Le chapitre qui va suivre constituera une suite des deux précédents. En effet, cette partie sera consacré à l'étude dynamique du véhicule électrique hybride série, nous aborderons les différentes contraintes mécaniques et environnementaux au quel doit faire face le véhicule et nous allons établir un modèle mathématique pour cet environnement et le modèle de transmission mécanique utilisé afin qu'on puisse les simuler sur Matlab Simulink

Introduction

La propulsion électrique est une des technologies clés pour le véhicule électrique hybride (VEH). De nombreux chercheurs travaillent sur la sélection des composants (convertisseurs, batteries.....) adéquats et notamment la machine électrique de traction pour le VEH. Le choix de la machine électrique dépend de sa plage de vitesse, de son rendement, ainsi de la dynamique du véhicule et l'architecture du système choisi. De plus, l'attente du conducteur, les contraintes du véhicule et la source d'énergie sont trois critères importants pour effectuer ce choix d'où la nécessité de les prendre en compte avant d'envisager un processus de fabrication et ceux en sachant que ces paramètres sont variables et parfois aléatoires.

Les progrès remarquable enregistré dans le domaine de l'informatique et la simulation numérique permet en effet de simplifié au mieux le travail des chercheurs en mettant à disposition des logiciels où l'on peut concevoir un véhicule virtuelle tenant compte des contraintes et des tâches qu'il aura à accomplir une fois mis en œuvre.

Dans ce chapitre, on s'intéressera à la dynamique du véhicule avec un aperçu général sur les solutions et les différents couplages mécaniques dans une chaîne de traction hybride série pour ensuite, faire une étude de l'environnement et la dynamique du véhicule.

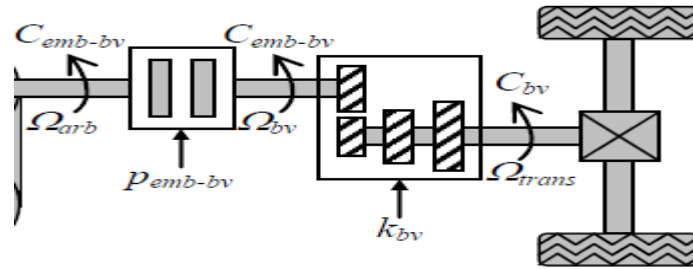
III.1. Solution de transmission mécanique dans une chaîne de traction hybride série

L'objet de la transmission mécanique est de relier le moteur électrique de traction à la roue motrice et ce, en adaptant la vitesse et le couple de celui-ci aux exigences fonctionnelles du véhicule. En effet, une inégalité entre le couple résistant et le couple moteur doit être respectée et assurée par le composant de transmission puisque la mobilité du véhicule exige un couple moteur supérieur au couple résistant. Plusieurs solutions assurant cette tâche peuvent être envisagées et sont : La boîte de vitesse, le réducteur mécanique et le différentiel qui assure la répartition équitable de la puissance aux roues et permet de faire tourner les roues à des vitesses différentes dans un virage.

III.1.1. Solution avec boîte de vitesse

Elle est caractérisée par un rapport variable, ce dernier, ainsi que la vitesse de référence sont obtenues à partir des cycles normalisés [Voir Paragraphe III.3]. On distingue deux types

de boites devitesse :Boite de vitesse automatique ne nécessitant pas un embrayage. Boite de vitesse un embrayage qui sert à changer le rapport de cette boite.



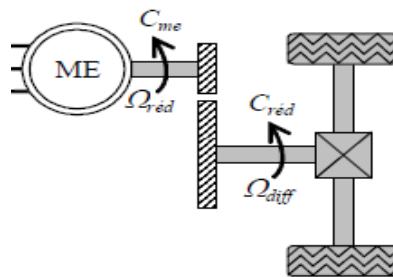
FigureIII.1 : *Synoptique de la transmission mécanique avec boîte de vitesse avec embrayage*

III.1.2. Solution avec réducteur

Le choix du réducteur dépend du type de véhicule et les caractéristiques de la machine de traction, essentiellement son couple. Il existe trois types de réducteurs selon leurs rapports :

Réducteur à rapport fixe utilisé pour notre modèle, à rapport variable étagé et à rapport continument variable.

Pour notre modèle,un réducteurà rapport fixe ($K_{red} = 5$) et un rendement ($\eta_{red} = 0.98$) estutilisé et représenté sur la figure (61.2) suivante : [Lhom01]



FigureIII.2 : *Synoptique de la transmission mécanique avec réducteur à rapport fixe*

Leséquationsqu'ils lui sontassocié sont :

$$\begin{cases} C_{red} = \eta_{red} \cdot K_{red} C_{me} \\ \Omega_{red} = K_{red} \cdot \Omega_{diff} \end{cases} \quad (III.1)$$

Chapitre III : Comportement dynamique d'un véhicule hybride série

C_{red}, C_{me} : Représente respectivement le couple du réducteur et le couple de la machine électrique de traction

K_{red} : Rapport du réducteur

η_{red} : Rendement du réducteur qui est en général bon et s'échelonne entre 0.95 et 0.98

Ω_{red} : vitesse a la sortie du réducteur

Ω_{diff} : vitesse différentielle qui s'exprime en fonction de la vitesse du véhicule et le rayon de la roue par :

$$\Omega_{diff} = R_{rou} \cdot V_{veh} \quad (III.2)$$

III.1.2.1. Représentation de la transmission mécanique sous Matlab Simulink

La transmission mécanique des motorisations se décompose en un réducteur, Un différentiel mécanique et une roue équivalente.

Le réducteur vise à adapter le couple de sortie au couple résistant [voir paragraphe 3.1].

Le différentiel mécanique permet de répartir la puissance aux roues tout en permettant de faire tourner les roues à des vitesses différentes en virage. La puissance développée sur chaque roue est différente quand le véhicule tourne. Toutefois la puissance appliquée sur le châssis du véhicule reste identique (en supposant que la conversion des roues soit parfaite). Pour notre étude, on considère que le véhicule roule en ligne droite, le différentiel mécanique n'a aucune utilité d'être représenté. La modélisation du différentiel mécanique avec les roues du véhicule peut donc s'apparenter à une seule roue équivalente. [Lhom01]

La figure (62.3) suivante représente cette solution de transmission mécanique.

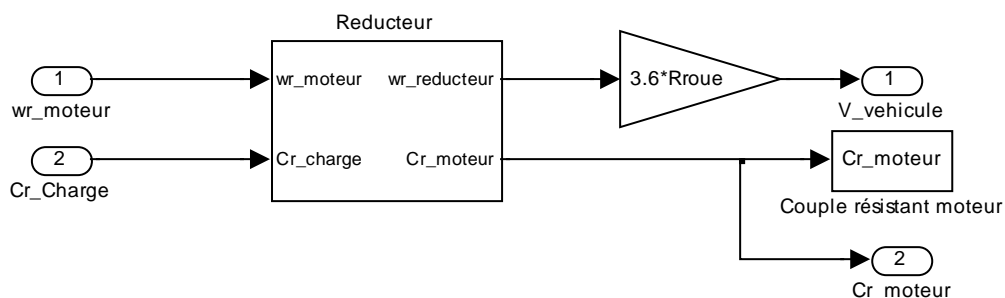


Figure62 .3: Schéma fonctionnel de la transmission mécanique utilisé

III.2. Performances dynamiques imposées au véhicule

La conception et le dimensionnement d'une chaîne de traction exigent la connaissance des performances critique que doit fournir chaque composant de cette chaîne, ces

Chapitre III : Comportement dynamique d'un véhicule hybride série

performances sont définîtes par rapport aux conditions maximales prévalent dans l'environnement de ce véhicule. Ainsi, la pente maximale, la vitesse maximale, le poids maximal...représentent ces conditions. Cependant, les performances maximales ne sont pas toujours utilisées dans les conditions normales, en effet la plupart du temps, la chaîne de traction travaille à charge partielle vue que les conditions varient beaucoup selon l'endroit où on conduit (montagne, autoroute, ville...etc.). En vue de faciliter la conception et le dimensionnement d'une chaîne de traction, plusieurs cycles normalisés ont été proposés ces dernières années, il s'agit alors de représenter les conditions typiques de conduite et qui sont variés suivant les régions ou les pays où ils ont été établis.

III.3. Quelques cycles normalisés

III.3.1. Nouveau cycle européen de conduite

Le nouveau cycle européen de conduite ou le NEDC (New European Driving Cycle) est largement adopté en Europe et représente une succession de cycles de conduite entamés par une conduite urbaine (UDC-Urban Driving Cycle) puis une conduite extra urbaine (EUDC_ExtraUrban Drive Cycle). [Mist11]

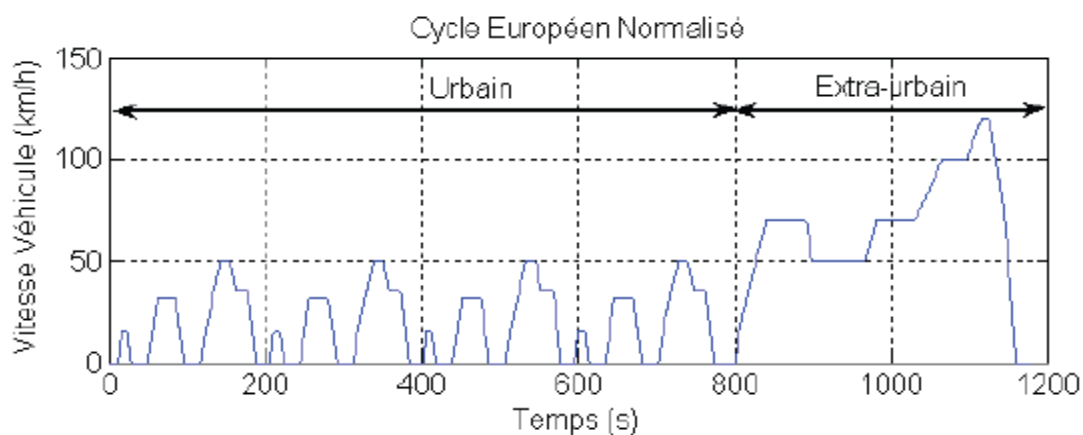


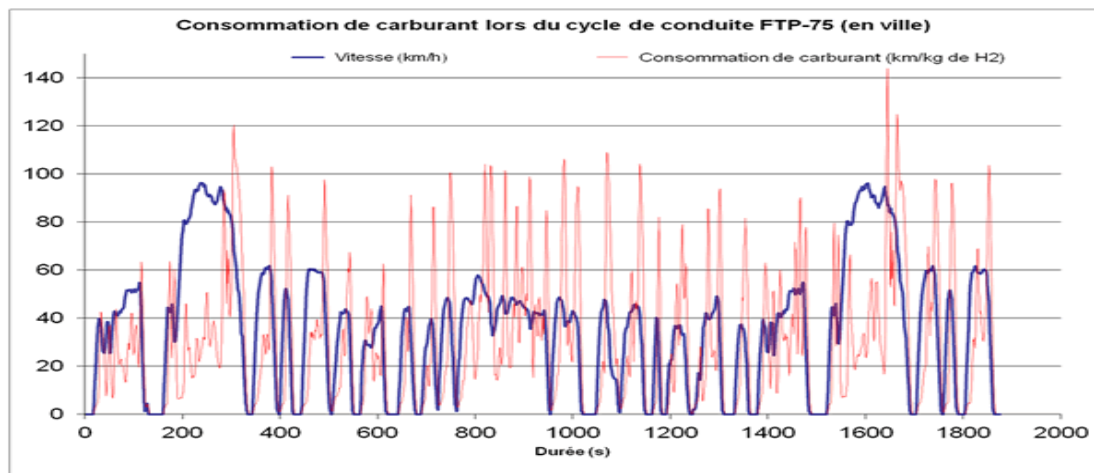
Figure 63.4 : Cycle de conduite européen NEDC. [Guen13]

63.3.2. Le cycle FUDS (Federal Urban Driving Schedule)

Établi aux USA, il a été développé à la base pour évaluer les émissions nocives des véhicules thermiques, il est basé sur des études statistiques du trafic à Los Angeles. Aujourd'hui, il est largement utilisé pour évaluer les consommations en carburant.

Chapitre III : Comportement dynamique d'un véhicule hybride série

dans les conditions de trafic urbain. Dans la littérature, on le trouve également sous le nom de « FTP 75 urban » (FTP –Federal Test Procedure). [Mist11]



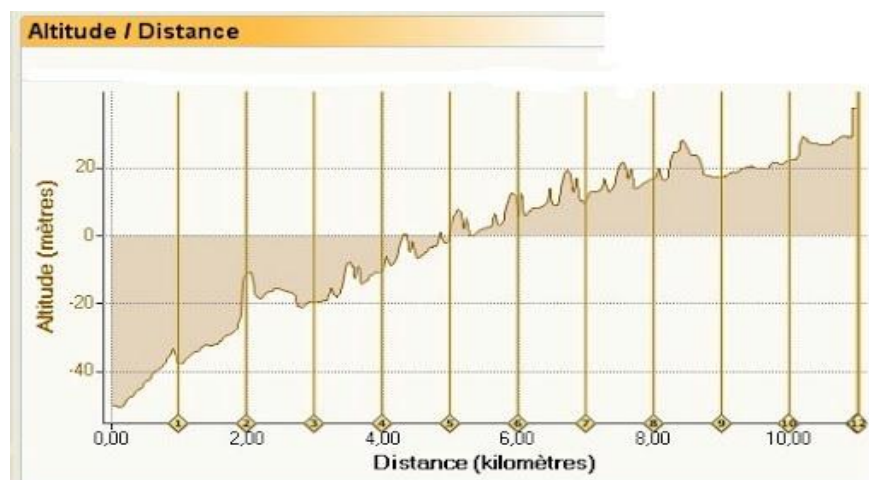
FigureIII.5 : Cycle de conduite américain FUDS.[Web01]

III.3.3. Le cycle FHDS (Federal Highway Driving Schedule)

Egalement établie aux USA, mais contrairement au FUDS, le cycle FHDS a été établie pour représenter la conduite entre les différents états des Etats Unis .on le trouve aussi sous le nom de « FTP 75 Highway ». [Mist11]

III.4. Profil d'élévation

Un profil d'élévation peut être associé à un cycle, il représente l'altitude du terrain en fonction de la distance parcouru, de ce profil, la pente que doit gravir le véhicule peut être calculé et intégré dans les conditions à imposées au véhicule.



FigureIII.6 : prototype d'un profil de pente. [Web02]

III.5. Environnement du véhicule

Un véhicule hybride est un moyen de transport et de déplacement qui permet une meilleure mobilité à l'homme. Ce déplacement s'effectue grâce à la puissance et au couple fournis par sa chaîne de traction, ces derniers doivent répondre aux exigences requises et qui sont imposés par l'environnement de ce véhicule comme la route, la pente, le vent ...etc. Ces exigences peuvent être étudiées et représentées sous forme de forces qui au final constitueront un couple résistant.

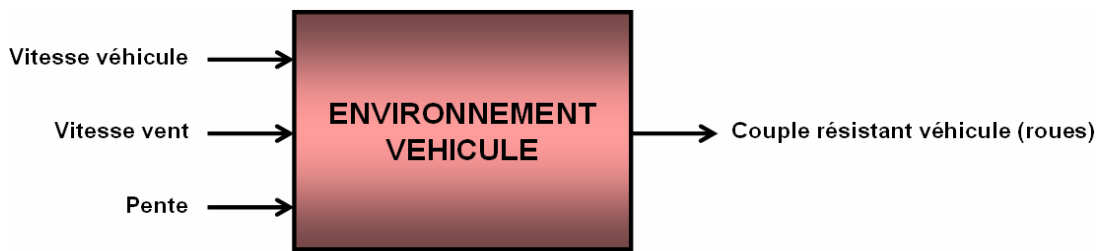
 [Aima02]

Figure III.7 : Entrées-sorties du modèle d'environnement du véhicule

L'ensemble des forces (entrées) régissant cet environnement est donné par l'expression suivante :

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{roul}} + F_{\text{aéro}} + F_{\text{pente}} + F_{\text{acc}} \quad (\text{III.3})$$

L'action de ces forces sur le véhicule ainsi que leurs sens sont illustrés sur la figure (III.8) suivante :

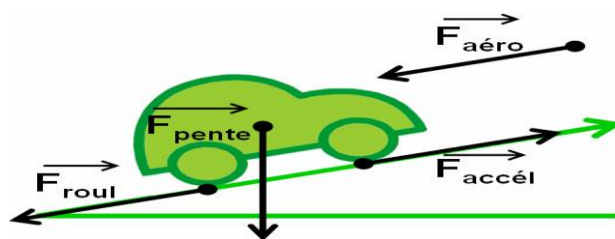


Figure III.8 : Forces appliquées sur le véhicule

✓ **Force de résistance aux roulements (F_{roul}) :**

En supposant que les quatre pneus sont identiques l'expression de cette force est donnée par :

$$F_{\text{roul}} = [C_{\text{rr}} \cdot M_{\text{av}} + C_{\text{rr}} \cdot M_{\text{ar}}] \cdot g = g \cdot M_{\text{v}} \cdot C_{\text{rr}} \quad (\text{III.4})$$

Avec : g : la gravité (9.81 m/s^2) et C_{rr} : Coefficient de roulement.

Chapitre III : Comportement dynamique d'un véhicule hybride série

Cette force est liée au coefficient de roulement (C_{rr}) des roues. Ce coefficient est affecté par plusieurs facteurs : Le type, la pression et la température des pneus ainsi que la vitesse du véhicule et le revêtement de la route, mais les facteurs les plus significatifs restent cependant le type et la pression des pneus. Ce coefficient est d'environ 0.015 pour les pneus classiques. Pour la traction électrique, Michelin a développé des pneus dit 'vert' d'une valeur de 0.007 soit environ la moitié d'un pneu classique. [Mist11]

✓ *Force de résistance aérodynamique (F_{aero}) :*

Le calcul de cette force exige de prendre en compte plusieurs paramètres, son expression est :

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_{px} \cdot (V_{veh} - V_{vent})^2 \quad (III.5)$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air pris généralement égal à 1.23 kg/m³

S_f : Section frontale du véhicule (m²)

C_{px} : Coefficient de pénétration dans l'air, il change de manière significative suivant le type de véhicule, le C_{px} est égale à : [Souf10]

-0.2 pour un véhicule ayant un très bon profil.

-0.3 pour un véhicule ayant un bon profil.

-0.5 pour un véhicule typique.

-0.7 pour une camionnette.

V_{veh} : Vitesse du véhicule (m/s).

V_{vent} : vitesse du vent (m/s), cette vitesse est prise suivant deux conventions :

➤ *Positive* si le vent s'oppose au mouvement du véhicule.

➤ *Négative* si le vent se déplace dans le même sens que le véhicule.

✓ *Force due à la pente (F_{pente}) :*

C'est la force nécessaire au véhicule de masse (m) pour vaincre une pente (exprimé en pourcentage dans le jargon routier), son expression est donnée par :

$$F_{pente} = g \cdot M_v \cdot \sin(\alpha) \quad (III.6)$$

Chapitre III : Comportement dynamique d'un véhicule hybride série

Avec α : L'angle de la pente.

g : La gravitation généralement prise à 9.81 m/s^2

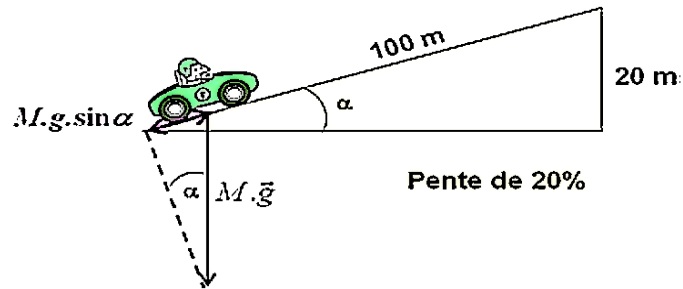


Figure 3.9 : Définition d'une pente

✓ **Force due à l'accélération (F_{acc}) :**

$$F_{acc} = M_V \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} \quad (\text{III.7})$$

On remplaçant les forces dans l'équation (67.3) par leurs expressions, l'expression de la force totale devient :

$$F_{tot} = g \cdot M_V \cdot C_{rr} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_{px} \cdot (V_{veh} - V_{vent})^2 + g \cdot M_V \cdot \sin(\alpha) + M_V \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} \quad (\text{III.8})$$

L'expression de la puissance à fournir en fonction de cette force et de la vitesse du déplacement du véhicule est donnée par :

$$P = F_{tot} \cdot V_{veh} \quad (\text{III.9})$$

Le couple résistant C_r est lié à la force totale par la relation :

$$C_r = F_{tot} \cdot R_r \quad (\text{III.10})$$

R_r : Rayon de la roue (m)

III.6. Etude de l'environnement du VEH série

La simulation de notre modèle s'effectuera sur le logiciel MATLAB Simulink, mais avant d'entamer la simulation, un cycle de fonctionnement doit être imposé. Le cycle qu'on va utiliser tiendra compte des paramètres d'un environnement qu'on définira, cet environnement

Chapitre III : Comportement dynamique d'un véhicule hybride série

aura pour variable la force due à la pente ,cette variance sera alors prise en compte pour aboutir à deux modèles de simulation .

III.6.1. Description

L'environnement impose les conditions dans lesquelles le véhicule et la chaîne de traction doivent évoluer, ces exigences sont exprimées en terme de force [voir paragraphe III.5] et varient souvent d'une région à une autre (vent) et parfois d'un point à un autre (pente). De ce fait, pour faciliter l'étude, on doit imposer ces exigences en négligeant le fait qu'elles sont variables, les cycles cités précédemment sont une parfaite illustration quoiqu'ils prennent beaucoup plus de paramètres que ce qui sera considéré pour notre étude, donc notre environnement d'étude est comme suit :

- ✓ La route est supposée plate et le parcours est droit sur une distance de 100 m dans un premier cas et elle est supposée être une pente de 20% sur une même distance pour le deuxième cas.
- ✓ La vitesse du vent est constante, on la considère négligeable.

III.6.2. Représentation de l'environnement sous Matlab Simulink

La figure (III.10) suivante représente le Schéma fonctionnel de l'environnement sous Matlab Simulink

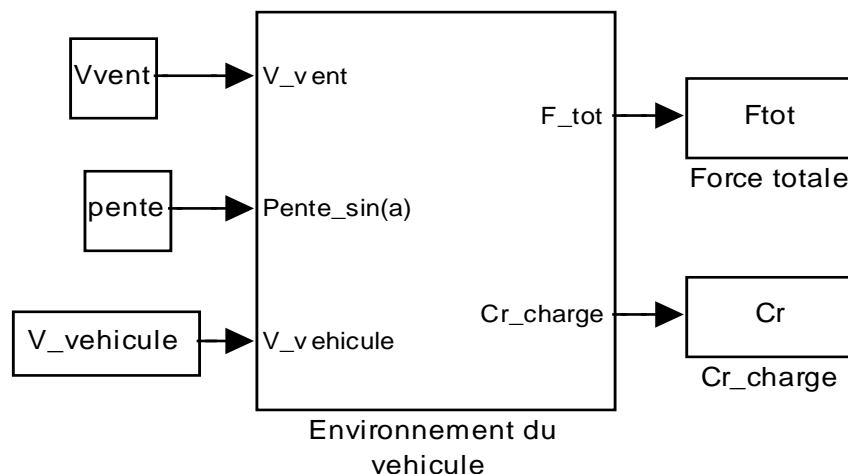


Figure III.10 : schéma fonctionnel de simulation de l'environnement

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé la dynamique du véhicule électrique hybride série en l'entamant avec des généralités sur la partie mécanique qui assure la transmission entre le moteur de traction et les roues ce qui nous a permis de faire le choix d'un réducteur à rapport fixe et d'un différentielle comme type de transmission utilisé pour notre modèle. Ensuite, on a défini d'un point de vue globale les performances dynamiques imposés au véhicule en les illustrants par des modèles de cycles de conduite extraits de résultats d'études et d'expérimentation réalisées dans différents pays ainsi qu'avec un profil de pente aléatoire. Nous avons également défini des modèles mathématiques incluant toute les forces appliquées par l'environnement sur le véhicule. A travers tous cela, nous avons établi des schémas block de simulation.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder les modes de fonctionnement d'un véhicule électrique hybride en dynamique, on donnera les paramètres imposés à l'environnement et également ceux du modèle du véhicule utilisé. En effet, les schémas block établis lors du chapitre deux et trois seront assemblés dans un ordre bien défini et qui assure la réalisation des différents modes de fonctionnement de ce type de véhicule, une fois la chaîne de traction électrique hybride série est établie, nous aurons à effectuer deux simulations sous environnement Matlab : La première sera pour un mode de fonctionnement hybride et la deuxième sera pour un mode de fonctionnement tout électrique.

Introduction

Le système hybride série permet au moteur électrique de diriger seul la rotation des roues en utilisant la puissance générée par le moteur thermique. Lors des faibles vitesses, le moteur thermique est utilisé par intermittence pour alimenter soit le moteur électrique, soit pour recharger la batterie. Le tout électrique, est utilisé en ville, sur route le moteur thermique assure la recharge de la batterie ainsi que l'alimentation du moteur électrique. Le nom série vient du fait que le moteur thermique, est directement lié en série au moteur électrique. De ce fait, il existe deux modes de fonctionnement principaux :

- Le fonctionnement hybride.
- Le fonctionnement toute électrique.

La simulation de ces deux mode de fonctionnement s'effectuera suivant :

- Les conditions précitées au chapitre deux qui stipule que : le groupe électrogène sera considéré comme une source de tension alternatif en mode hybride.
- Pour les autres éléments, les paramètres sont extrait d'un modèle de véhicule hybride série pratique, une Toyota Prius. [Bail14]
- Les conditions imposées à l'environnement dont les paramètres sont résumé dans le tableau (70.1).

IV.1. Paramètres de l'environnement imposé

L'environnement d'un véhicule dépend de plusieurs paramètres [voir paragraphe. 70.2_70.5]. Ces derniers doivent être définis et pris en compte pour pouvoir simuler le fonctionnement dynamique d'un véhicule. Le tableau (IV.1) résume les paramètres considérés et imposés.

Paramètres	Valeur/type
Masse volumique de l'air ρ [kg/m ³]	1.23
La gravitation g [m/s ²]	9.81
Vitesse du vent V_{vent} [m/s]	1.38
Profil de route $_{pente}$ [%]	Cas 1 : 0 % → Plat
	Cas 2 : 20% → Cote
Type de parcours	droit

Tableau IV.1 : Paramètres de l'environnement imposé

Chapitre IV: Simulation du modèle du véhicule hybride série étudié

IV.2. Caractéristiques du VEH série

Le tableau (IV.2) ci-dessous donne les caractéristiques du véhicule considéré. [Bail14]

<u>caractéristiques</u>	<u>valeur</u>
Masse du véhicule +charge $_M_v$ [kg]	1500
Section frontale du véhicule $_S_f$ [m ²]	2.57
Coefficient de pénétration dans l'air $_C_{px}$	0.26
Rayon des roues $_R_r$ [m]	0.3
Coefficient de roulement $_C_{rr}$	0.0017

Tableau IV.2 : *Caractéristiques du véhicule étudié.*

IV.3. Calcul du couple résistant total

En remplaçant les caractéristiques du véhicule et les paramètres de l'environnement illustrés par les tableaux (IV.1 et IV.2.) par leurs valeurs dans les équations de l'environnement [voir paragraphe 3.5], on arrivera aux résultats présentés dans le tableau (IV.3) suivant :

	F_{rou} [N]	F_{aero} [N]	F_{pente} [N]	F_{acc} [N]
<u>Cas1</u> : pente de 0%	25,01	$0.42 * (V_{veh} - 1,38)^2$	0	$M_v * \frac{dV_{veh}}{dt}$
<u>Cas2</u> : pente de 20%	25,01	$0.42 * (V_{veh} - 1,38)^2$	2943	$M_v * \frac{dV_{veh}}{dt}$

Tableau IV.3 : *Résultats relatifs aux conditions considérées*

Les résultats du tableau (71.3) montrent clairement que les forces appliquées sur le véhicule sont directement liées à sa vitesse et à son accélération ce qui implique que : la puissance que doit fournir le moteur électrique de traction et le couple résistant qu'il doit compenser sont proportionnelles au carré de la vitesse et à l'accélération du véhicule. En remplaçant les résultats du Tableau (71.3) dans les équations [voir paragraphe 71_5 à 71_6] on aboutit aux équations (IV.1-IV.2) qui donnent respectivement la puissance nécessaire en

Chapitre IV: Simulation du modèle du véhicule hybride série étudié

fonction de V_{veh}^2 et de $\frac{dV_{veh}}{dt}$, le couple résistant de charge en fonction de ces mêmes paramètres.

$$\begin{cases} P_{développé_1} = \left[25,01 + 0,42 \cdot (V_{veh} - 1,38)^2 + 1500 \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} \right] \cdot V_{veh} \\ P_{développé_2} = \left[2968,01 + 0,42 \cdot (V_{veh} - 1,38)^2 + 1500 \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} \right] \cdot V_{veh} \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$\begin{cases} C_{rés charge_1} = \left[25,01 + 0,42 \cdot (V_{veh} - 1,38)^2 + 1500 \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} \right] \cdot R_{roue} \\ C_{rés charge_2} = \left[2968,01 + 0,42 \cdot (V_{veh} - 1,38)^2 + 1500 \cdot \frac{dV_{veh}}{dt} \right] \cdot R_{roue} \end{cases} \quad (72.2)$$

A noté que pour les calculs, l'unité de la vitesse du véhicule est le mètre par seconde [m/s], les puissances seront alors en Watt [W] et le couple en [N.m].

72.4. Simulation Sous Matlab Simulink

La simulation s'effectuera avec changement d'un seul paramètre de l'environnement du véhicule [voir Tableau (IV.1 et IV.2)]. Les schémas block des figures (IV.1- 72.6) sont respectivement les mêmes utilisés pour le deuxième cas [voir paragraphe IV.4.3/B].

A- Cas où la pente est non nulle (20%)

72.4.1. Simulation en Mode hybride

La figure (IV.1) suivante représente le schéma block de simulation d'un véhicule électrique hybride série en mode de fonctionnement hybride.

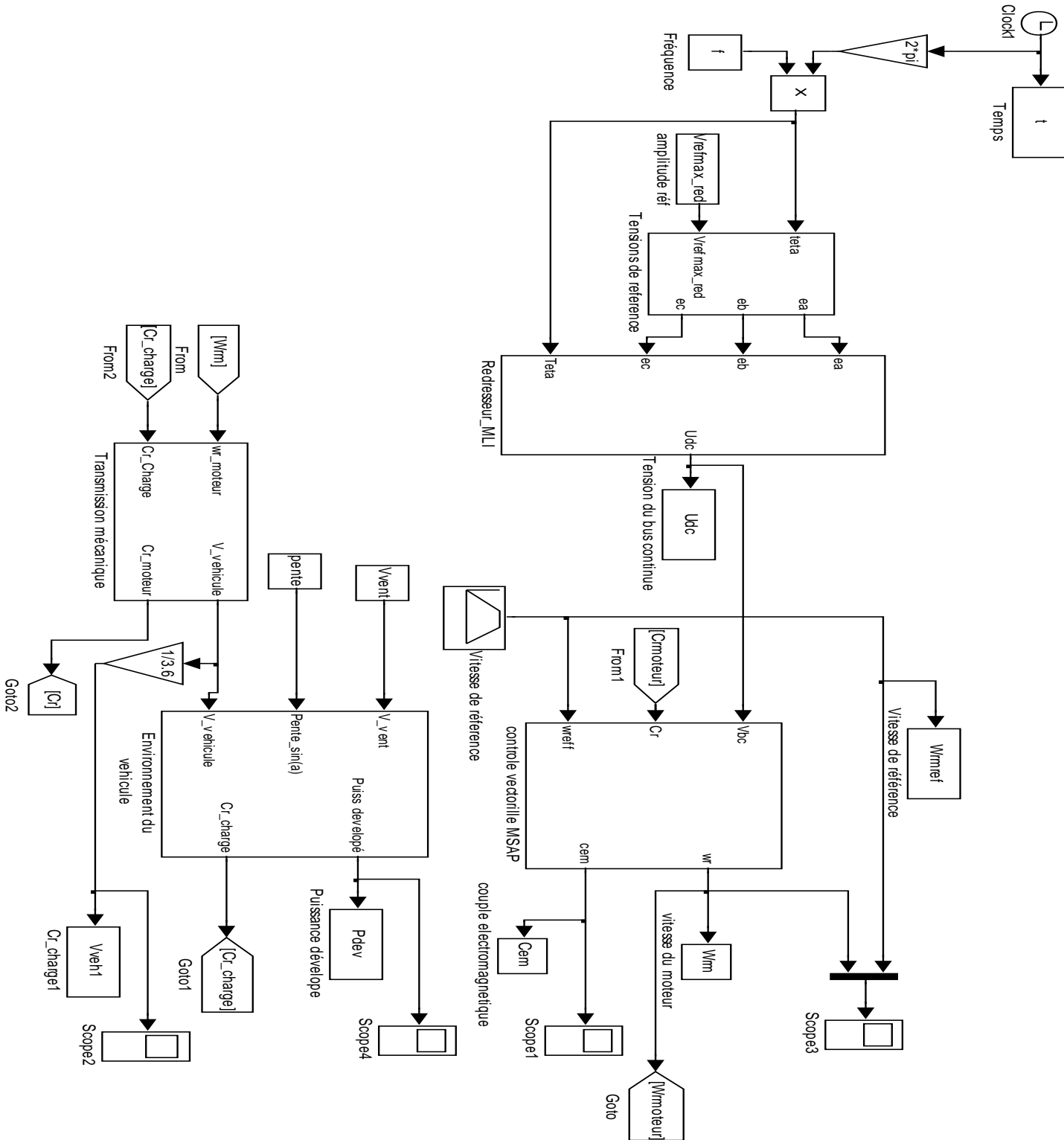


Figure IV.1 : schéma de simulation du fonctionnement hybride

74.4.1.1. Résultats de la simulation

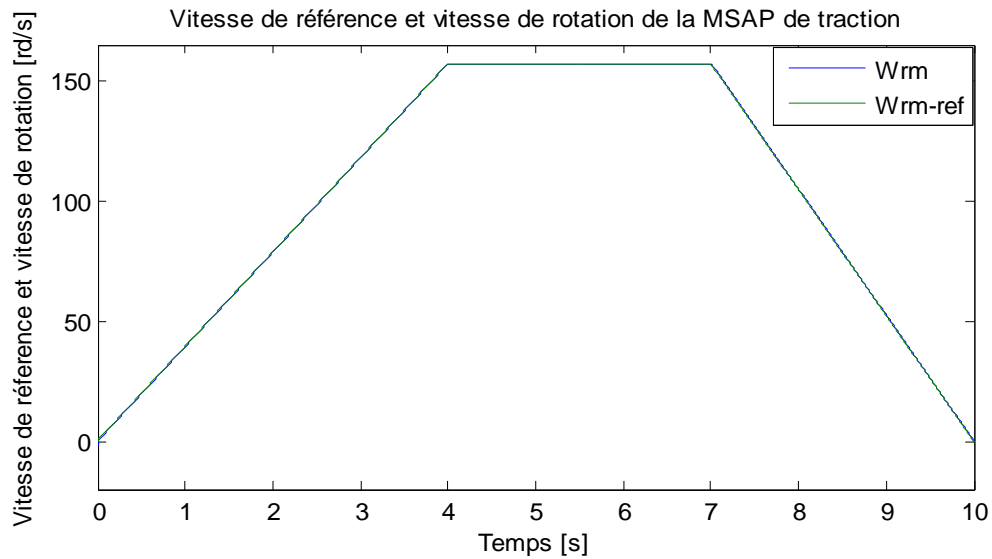


Figure IV.2: Allure de la vitesse de référence et de rotation de la MSAP de traction –pente de 20 %

La figure IV.2 présente l'allure de la vitesse de rotation (W_{rm}) de la MSAP de traction et la vitesse de référence (W_{rm-ref}) imposée. La vitesse de rotation suit continuellement la référence et les régulateurs ont assuré une bonne précision et également un bon temps de réponse.

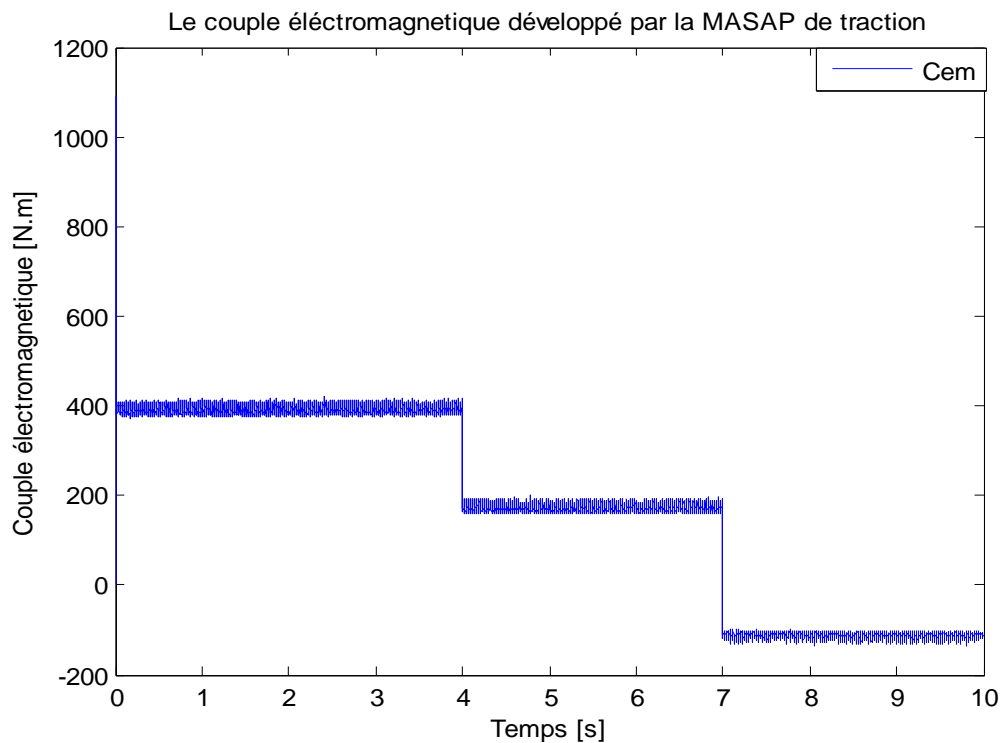


Figure IV.3: Couple électromagnétique développé par la MSAP de traction –pente de 20%

Chapitre IV: Simulation du modèle du véhicule hybride série étudié

La figure(IV.3) montre le couple électromagnétique développé par la MSAP de traction .les valeurs enregistrées entre 0 et 7s sont essentiellement dues à deux facteur principaux : la pente qui est de 20% durant toute cette période de fonctionnement et l'accélération du véhicule entre 0et 4s ou le couple atteint une valeur 400 N.m pour chuter de la moitié entre 4 et 7s ,période ou le véhicule roule a une vitesse constance ce qui annule l'accélération.une valeur négatif du couple est également enregistré ,elle due a la décélération du véhicule entre 7 et 10 s.

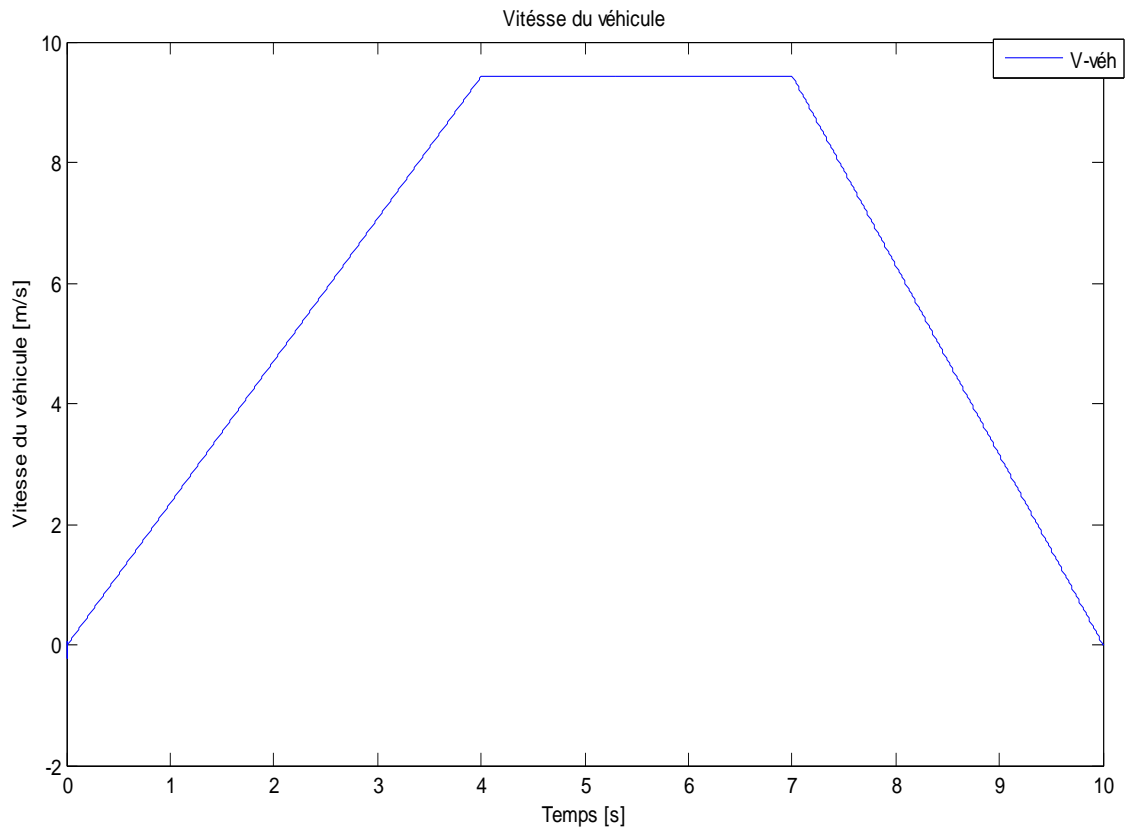


Figure IV.4 : *Vitesse du véhicule roulant sur une pente de 20 %*

La figure IV.4 illustre la vitesse du véhicule, elle augmente entre $t=0$ et $t=4$ s ce qui implique qu'une accélération est effectuée, ensuite elle prend une valeur constante ce qui implique qu'un régime est maintenu et l'accélération est nulle entre $t=4$ s et $t=7$ s après il y a une décélération et la vitesse diminue pour s'annuler à $t=10$ s.

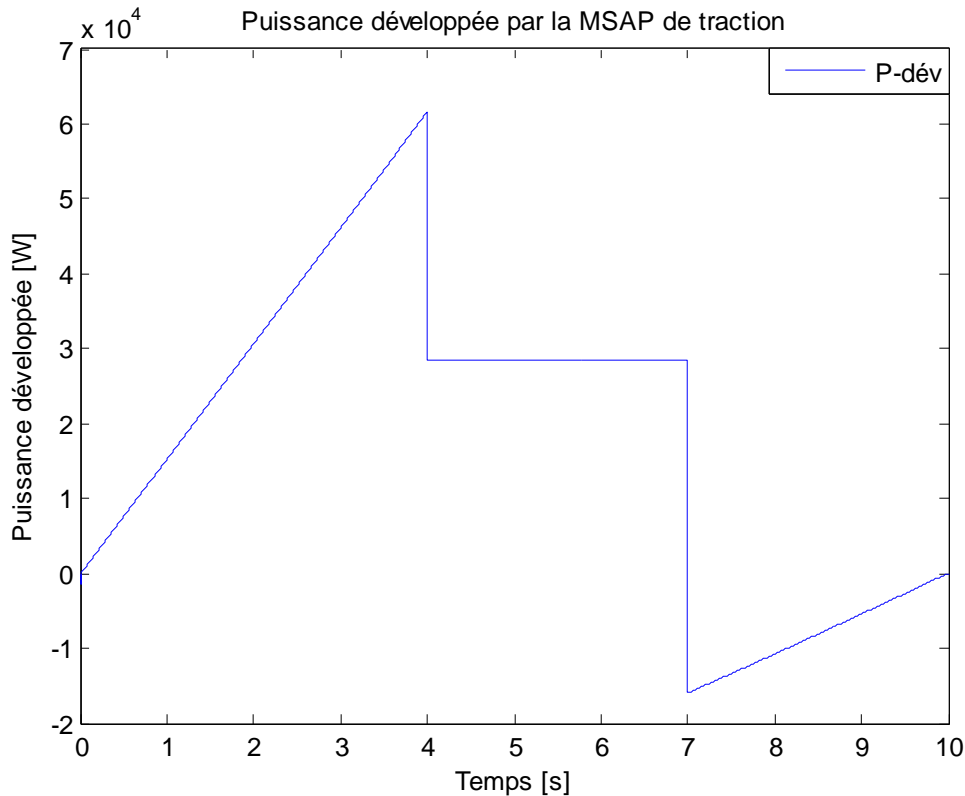


Figure IV.5: Puissance développée par la MSAP de traction pour une pente de 20 %

La figure IV.5 donne la valeur de la puissance développée par la MSAP de traction. Cette dernière est proportionnelle au carré de la vitesse et à l'accélération du véhicule [voir équations IV.1, IV.1].

Entre 0 et 4s, la puissance augmente puis diminue brusquement lorsque l'accélération s'annule et la vitesse du véhicule est constante et prend une valeur constante entre 0 et 7 seconde puis elle diminue et prend une valeur négative lorsque il y a une diminution de la vitesse du véhicule avec décélération.

76.4.2. Simulation en Mode toute électrique

La figure (IV.6) suivante représente le schéma block de simulation d'une véhicule électrique hybride série en mode de fonctionnement tout électrique.

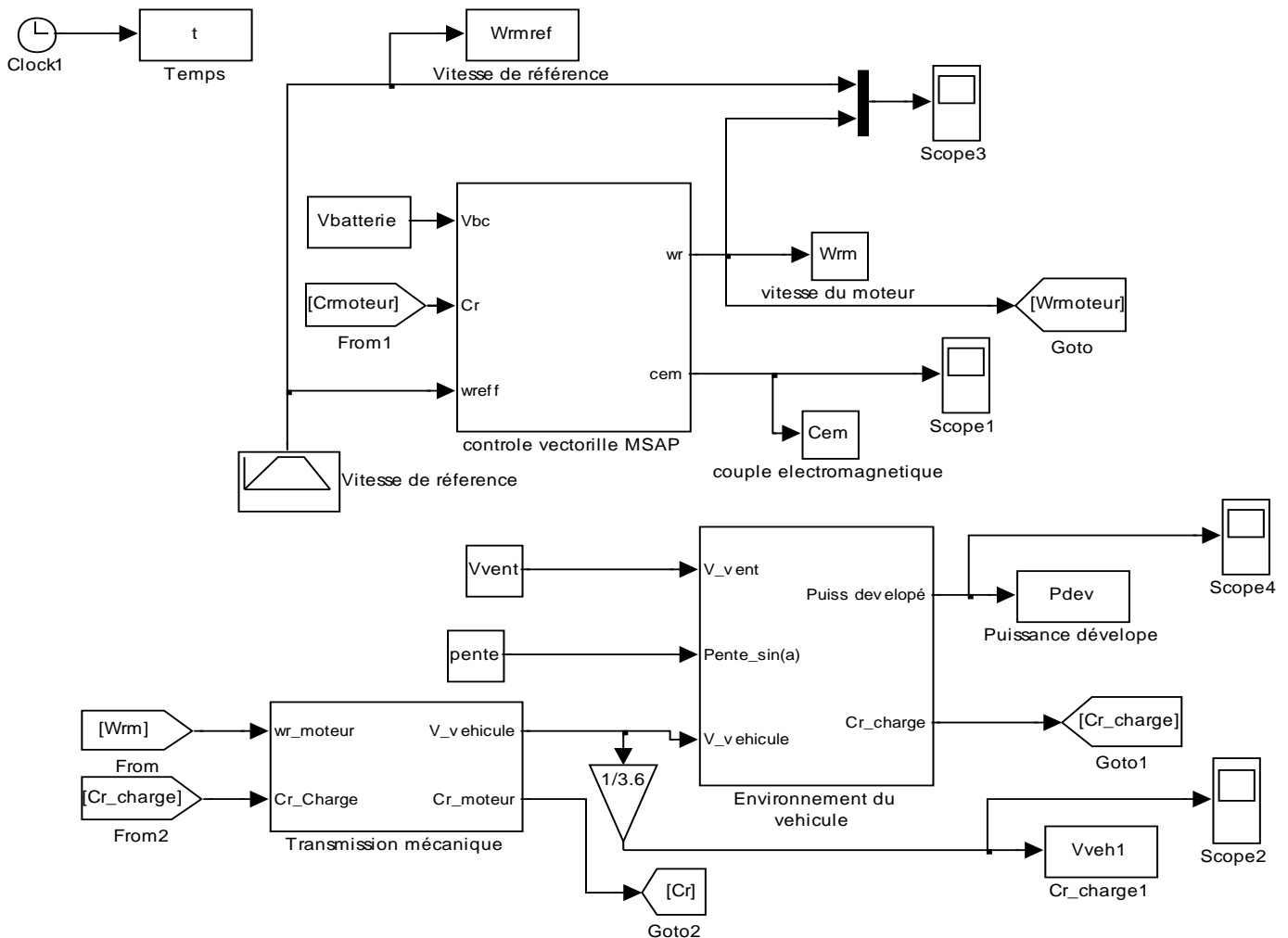


Figure IV.6: schéma de simulation du fonctionnement hybride

77.4.2.1. Résultats de la simulation

Dans ce travail, les résultats du mode de fonctionnement toute électrique sont analogue au résultat du fonctionnement hybride du fait que le moyen de stockage et ses caractéristiques n'ont pas été pris en compte, ce dernier n'est représenté que par une tension constante ce qui correspond à la tension délivrée par les redresseurs à MLI.

77.4.3. Interprétation des résultats

Plusieurs paramètres peuvent influencer sur le fonctionnement d'un véhicule électrique hybride. Dans ce travail, nous avons choisi de varier un paramètre pour un même profil de vitesse : il s'agit de la pente. Nous avons constaté que :

Chapitre IV: Simulation du modèle du véhicule hybride série étudié

La valeur de la pente intervient directement dans la variation des caractéristiques développées par la machine (couple et puissance) [voir figure IV.3 et IV.5]

La variation de vitesse du véhicule (accélération, décélération) constitue un facteur très important dans la détermination ces mêmes caractéristiques.

ces résultats peuvent être déterminé analytiquement a travers les équations associé a la puissance et au couple mis en jeux dans le fonctionnement d'un véhicule électrique hybride[voir équ78.1et 78.2]

B- Cas où la pente est nulle

Les schémas block de simulation pour le mode de fonctionnement hybride et le mode de fonctionnement tout électrique sont respectivement représentés sur les figure (IV1.- IV6).

78.4.4.Résultats de la simulation pour un fonctionnement hybride

Les allures de vitesse de référence et vitesse de rotation ainsi que celle du véhicule sont identique à celle obtenue pour une pente de 20% illustré respectivement sur les figure (IV.2 etIV.4) ci-dessus puisque elle corresponde à une référence et un choix établie.

78.4.5.Résultats de la simulation pour un fonctionnement tout électrique

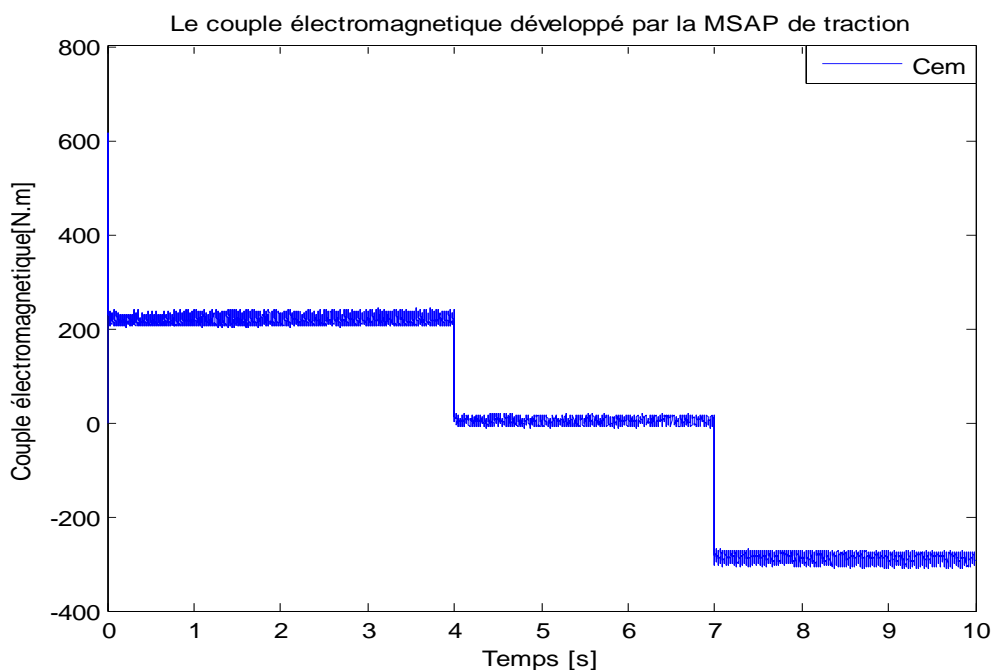


Figure IV.7: Couple électromagnétique développé par la MSAP de traction –pente nulle

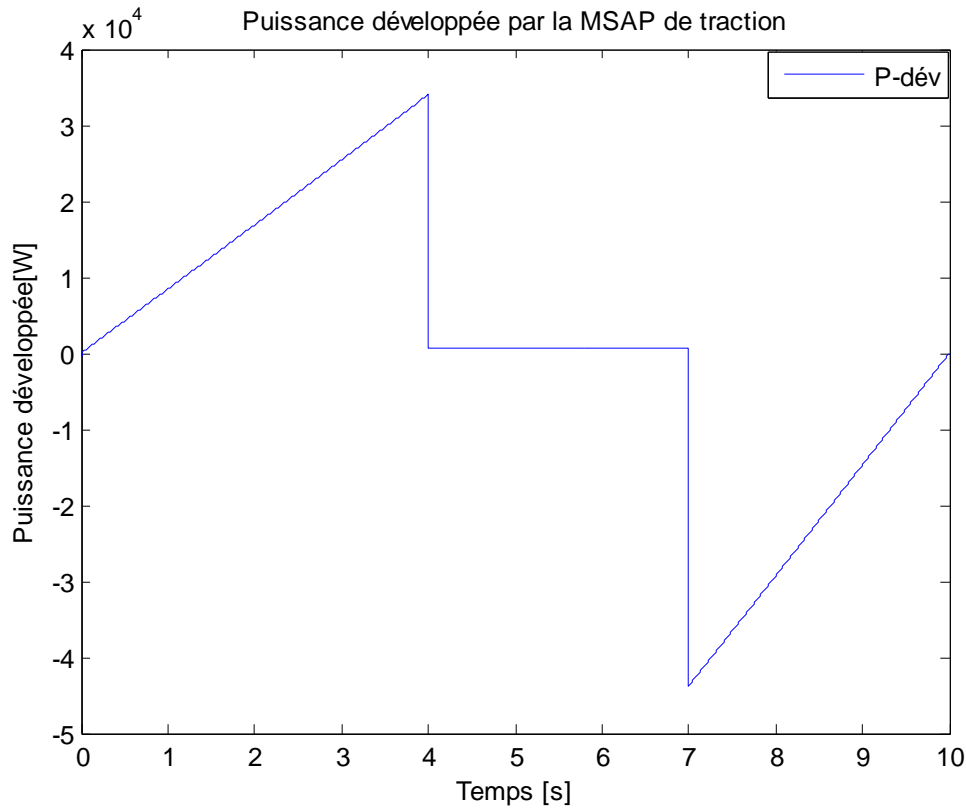


Figure IV.8: *Puissance développée par la MSAP de traction pour une pente de nulle*

79.4.6. Interprétation des résultats

Les figures (IV.7 et IV.8) présentent respectivement l'allure du couple et la puissance développés par la MSAP pour un mode de fonctionnement hybride suivant une pente nulle. Ces résultats montrent :

Une diminution significative des valeurs du couple et de puissance par rapport à ceux enregistrés pour une pente de 20%, ce qui montre l'influence du paramètre de la pente sur les caractéristiques développées par la MSAP de traction.

Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons pu vérifier les hypothèses de départ. En effet, nous avons effectué une simulation globale du véhicule électrique hybride série et du système de traction qui le régit. Cette simulation a pu être effectuée avec les conditions, les paramètres et les caractéristiques établies dans les chapitres précédents. Nous avons conclu que l'influence de ces derniers peut être significative et notamment pour certains. Exemple, l'influence du paramètre de pente sur la puissance et le couple que doit développer la MSAP de traction

Chapitre IV: Simulation du modèle du véhicule hybride série étudié

ainsi que le choix de la commande et une régulation appropriée qui détermine la rapidité et également la précision des résultats attendue sont est importante et déterminante.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les enjeux environnementaux et la montée du prix du carburant incitent les acteurs du domaine automobile à trouver des solutions pour réduire la consommation énergétique de leurs véhicules. Comme nous l'avons vu, un axe d'amélioration est l'hybridation de la chaîne de traction.

En effet, les véhicules électriques hybrides permettent une diminution de la consommation par rapport aux véhicules conventionnels. Dans une démarche d'étude, de modélisation et voir de conception, plusieurs paramètres sont alors à prendre en compte de façon globale. Le premier choix à effectuer revient à la structure de la chaîne de traction (série, parallèle, mixte..). Le deuxième concerne le dimensionnement des composants, parmi lesquels le moteur thermique, la ou les machines électriques et la batterie ou un autre organe de stockage. Cette démarche a été suivie dans le travail effectué puisque des paramètres ont été pris en compte tel l'environnement et les contraintes que doit subir le véhicule, de plus le choix a été porté sur une structure hybride série dont les éléments sont : un système de génération d'énergie électrique (réservoir, génératrice, moteur thermique), une machine synchrone à aimants permanents assurant l'intégralité de la traction des roues et un super condensateur comme élément de stockage quoique, la modélisation et les dimensions utilisés pour certains de ces éléments ont été modifiés. En effet, le système de génération de l'énergie électrique a été assimilé à une source de tension triphasé équilibré à fréquence et amplitude variable et le système de stockage quand à lui a été pris carrément comme étant une consigne de tension continue fixe (500V), la est les deux modifications effectuées et qui sont propres à notre démarche suivie dans notre travail.

Dans du premier chapitre, un état de l'art sur les véhicules hybrides, leurs types, les différentes structures existantes est rapporté pour ensuite exposer les différentes technologies des éléments utilisés dans la chaîne de traction hybride série définies comme l'objet d'étude. Nous avons pu conclure à travers ce chapitre qu'aucune des configurations n'est parfaite et qu'elles ont sous leurs différentes formes chacune, des avantages à faire valoir mais également des inconvénients suivant le domaine d'utilisation.

Le deuxième chapitre traite les différents éléments électriques d'une chaîne de traction hybride série. En effet, une étude détaillée a été menée sur chaque élément. La procédure suivie fut de : Définir l'élément, donner son principe de fonctionnement, lui établir un modèle mathématique et une commande appropriée pour finalement, le simuler.

Conclusion Générale

Nous avons pu constater que les éléments de convection d'énergie électrique (MSAP, redresseur à MLI, onduleur à MLI) se caractérisent par une multitude de commandes qui peuvent leur être associées. À travers les résultats obtenus, nous pouvons conclure donc que, les commandes choisies et la régulation effectuée pour chaque élément étaient bien choisies et répondent au mieux à ce qui était attendu (Temps de réponse, précision, allure).

Le troisième chapitre a fait office d'une présentation et d'une définition du comportement dynamique d'un véhicule électrique hybride série. En effet, ce chapitre a présenté tout d'abord, les éléments de transmissions mécaniques et les différentes solutions existantes, un choix sur le modèle de transmission qui consiste en un réducteur à rapport fixe et une différentielle a été faite et par conséquent une modélisation et un schéma block de simulation lui sont établis. Ensuite, l'environnement du véhicule a fait l'objet d'une étude généralisée et élargie avec les différentes contraintes que peut imposer ses paramètres d'où résultent des forces réagissant de manière directe sur la dynamique du véhicule. Quelques cycles normalisés ont été cités afin d'avoir une idée précise sur la manière de procéder avant d'entamer une étude dynamique. Ce chapitre nous a donc permis de comprendre que : avant d'entamer une simulation d'un véhicule électrique hybride, un cycle de fonctionnement doit être défini au préalable et les conditions de l'environnement doivent aussi être connues et incluses dans le modèle de simulation, de ce fait, nous avons conçu un modèle d'environnement propre à notre travail avec un profil de vitesse, de pente ainsi que les autres paramètres qui pour certains étaient constants (masse du véhicule, coefficient de roulement, vitesse du vent.....) et pour d'autres variables (pente).

Le quatrième chapitre est l'œuvre de ce travail puisque il concrétise tout ce qui a été rapporté lors des précédents chapitres. En effet, il a présenté deux modes de fonctionnements du véhicule électrique hybride : fonctionnement hybride et fonctionnement tout électrique. nous avons constitué une chaîne de traction en reliant tous les schémas block déjà établis cela s'est effectué dans un ordre qui respecte l'écoulement de puissance (Sources -MSAP-Roues), par la suite, une simulation sur Matlab Simulink a été effectuée pour les deux modes de fonctionnement cités ci-dessus. Les paramètres de simulation sont également issus de ceux utilisés et définis lors des chapitres précédents. Les résultats obtenus lors de ces simulations indiquent que la démarche choisie est théoriquement correcte puisque les valeurs et les allures de vitesse, de couple et de puissance paraissent logiques et cohérentes et donc, on peut conclure que les stratégies de commandes ainsi que l'ensemble du travail effectué sont concordants.

Conclusion Générale

Et pour finir, nous émettons des recommandations pour qui veut œuvrer dans l'accomplissement et la perfection de ce travail, en effet, ce mémoire a pu être complété dans son intégralité et les résultats obtenus ont été conformes aux prévisions et aux hypothèses de départ. Cependant le modèle a été réalisé suivant différentes hypothèses simplificatrices et par conséquent a montré certaines limites et ne peut être pratique.

De ce fait, nous pouvons recommander une étude plus réaliste d'un véhicule électrique hybride série et pour faire, plusieurs améliorations pourraient être additionné à ce travail afin de le rendre plus précis : La première chose que le modèle proposé pourrait inclure, est un modèle d'élément de stockage (super condensateur) plus conforme à la réalité. En effet, dans ce travail, le super condensateur a été modélisée par une consigne de tension constante. Or la tension d'un super condensateur varie selon la charge et c'est un système plus complexe que ce qui a été considéré. Il serait donc très pertinent de pouvoir inclure un modèle précis de supercondensateur.

Deuxièmement, La prise en compte et la modélisation du système de génération de l'énergie électrique (réservoir ,moteur thermique ,génératrice) que nous avons pris dans ce travail comme étant une source de tension triphasé idéal ,est très intéressante puisque ce système permettra de suivre le taux des émissions rejeté par le dispositif thermique ce qui est nécessaire pour la mise en œuvre pratique d'un véhicule électrique hybride.

De plus, dans la partie transmission mécanique du véhicule électrique hybride série, le réducteur a été modélisé en utilisant un rapport fixe. Or dans le système réel de ce type de véhicule, il s'agit d'une transmission variable en continu dont le rapport de réduction est géré électroniquement ou manuellement. Également, dans le système de transmission, des pertes pourraient être représentées pour obtenir un bilan énergétique du véhicule plus précis.

Enfin le sous-système de gestion de l'énergie pourrait prendre en compte l'état de charge et de décharge de la batterie ainsi que le rapport de transmission de la liaison mécanique. L'objectif du véhicule hybride étant l'amélioration du rendement énergétique du véhicule ainsi que la diminution de ses émissions polluantes, une étude sur ces sujets pourrait être entreprise. Par conséquent, le système de gestion de l'énergie pourrait être plus fidèle à la réalité en tenant compte de ces paramètres afin de compléter ces objectifs.

Bibliographie

[Lhom01]_ W .LHOMME <<Gestion de l'énergie de véhicule électrique hybride basée sur la représentation énergétique macroscopique>>. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologie de Lille, France, 2007.

[Aima02]_ A.NOUH << Contribution Au Développement D'un Simulateur Pour Les Véhicules Electriques Routiers>>, Thèse doctorat, Université de technologie Belfort Montbéliard, France, 2008.

[Boulo03]_ L.BOULON<< Modélisation multiphasique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie. >>, Thèse doctorat Docteur de l'Université de Franche-Comté.

[Cam04]_ M. CAMARA<<Super condensateur Pour Echange Dynamique d'Energie à Bord Du VEH>>, Thèse doctorat, Université de Franche Compté, France, 2007.

[Boul05]_ A. BOULAHIA<<étude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique >>, Thèse doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2009.

[Njan06]_ N.JANIAUD<< MODELISATION DU SYSTEME DE PUISSANCE DU VEHICULE ELECTRIQUE EN REGIME TRANSITOIRE EN VUE DE L'OPTIMISATION DE L'AUTONOMIE, DES PERFORMANCES ET DES COUTS ASSOCIES>>, Thèse doctorat, Université Paris-Sud 11, France, 2011.

[Ouik07]_ B.OUIKENE<<Modélisation et simulation de l'ensemble MSAP_Onduleur à MLI vectorielle et naturelle Commande vectorielle sous logiciel Matlab>>, DEUA, UMMTO, Algérie, 2009.

[Bena08]_ S.BENAMROUCHE et H.SAIGH<<Commande Vectorielle De La Machine Synchrone à Aimant Permanent Commandée En Tension>>, ingénieur, UMMTO, Algérie, 2000.

[Abde09]_ H.ABDELLAOUI<<Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variables électriques >>, Magister, UMMTO, Algérie.

*[Souf10]*_G. SOUFFRAN<<Dimensionnement de la chaîne de traction d'un véhicule électrique hybride basé sur une modélisation stochastique de ses profils de mission>>, Thèse doctorat, Université de NANTES, 2012.

*[Mist11]*_V.MESTER<<Conception Optimale Systémique Des Composants Des Chaines De Traction Electrique >>, Thèse doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, 2007.

*[Daan12]*_A.DAANOUNE<<Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides>>, Thèse doctorat, Université de Grenoble, France, 2006.

*[Guen13]*_S.E.GUENIDI << Modélisation, commande de gestion de l'énergie d'un véhicule électrique hybride >>, laboratoire de commande des processus(LCO), Ecole national polytechnique, El-Harrach, Algérie.

*[Bail14]*_B.GUILLAUM<<Simulation multi domaine d'un cycle de propulsion hybride électrique sous l'environnement Matlab>>, Maitrise, Ecole de Technologie Université de Québec, Canada, 2006.

*[Mult15]*_B.MULTON<<Motorisation des véhicules électriques>>, Docteur –professeur, Ecole National Supérieure (ENS), Cachan-Antene, Bretagne.

*[Aouz16]*_H.AOUZELLAG<<stratégie de commande d'un véhicule hybride>>, Master Université de Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, 2013.