



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira - Béjaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en Génie Electrique  
option Electromécanique

**Thème**

Introduction des Machines Asynchrones à  
Double Alimentation dans les Véhicules  
Électriques

Présenté Par :

Mr N. BRAHMI

Mr Z. CHANOUN

Encadré Par :

Mr D. AOUZELLAG

Mr R. BABBOURI

Juin 2012

*L'individu est reconnu comme un sujet universel,  
porteur de droits et de devoirs, qu'il peut comprendre  
ses actes comme une manifestation - respectée par tous -  
de sa propre autonomie.*

**Axel Honneth**<sup>1</sup>

o o o

## Remerciements

*"On parvient rarement à ses fins par ses propres moyens ; il faut toujours compter sur quelqu'un d'autre"*

Nos sincères remerciement à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné afin de réaliser ce mémoire.

Nos vifs remerciements accompagnés de toutes nos gratitudes vont tout d'abord à notre encadreur Monsieur AOUZELLAG Djamel, Maître de conférences à l'université de Bejaia, pour nous avoir proposé ce sujet que nous trouvons très intéressant et d'actualité, pour ses conseils et orientations. Nous le remercions surtout pour nous avoir fait confiance durant toute cette année ainsi que notre co-promoteur Monsieur BABBOURI Rabah, Doctorant à l'université de Bejaia, pour son aimable collaboration.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Monsieur BENNAI Khalef, à Monsieur MAAFA Omar ainsi qu'à Monsieur ABDOUNE Fateh.

Egalement un remerciement à tous les étudiants de la 2ème Année Master Génie électrique (LMD) promotion 2012.

Nous souhaitons enfin remercier du fond du coeur nos familles et nos proches pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de notre vie.

A toutes et à tous, merci.

---

<sup>1</sup>Le philosophe Axel Honneth est l'un des chefs de file de l'École de Francfort et s'attache à une philosophie sociale qui insiste sur l'importance de la relation à autrui, à soi-même et au monde. Cette citation est tirée de son ouvrage : Les trois sphères de reconnaissance de l'individu.

## Dédicaces

A qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

A toute la famille BRAHMI.

A toute la famille BOUNECER

A mes amis.

A tous ceux dont les noms m'ont échappé.

N.BRAHMI

## **Dédicaces**

Je dédie ce mémoire à :

Ma très chère mère et mon père qui se sont sacrifiés tout au long de mes études.

Mes frères et mes soeurs.

Toute la famille CHANOUN.

Toute la famille HAMA et la famille CHABANE.

Tous mes amis.

Et tous ceux qui me sont chers.

Z.CHANOUN

# Table des matières

Table des Matières	i
Introduction générale	1
<b>1 Différentes classes de véhicules électriques et exemples de réalisations</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Véhicule tout électrique . . . . .	4
1.2.1 Historique . . . . .	4
1.2.2 Réalisations . . . . .	6
1.2.2.1 Véhicules électriques commercialisés . . . . .	7
1.2.2.2 Moteurs roues . . . . .	8
1.2.2.3 Véhicules électriques et source d'énergie embarquée . . . . .	9
1.3 Véhicule hybride . . . . .	12
1.3.1 Historique . . . . .	12
1.3.2 Définition et classifications . . . . .	13
1.3.3 Hybride " micro " . . . . .	15
1.3.4 Hybride " mild " . . . . .	16
1.3.5 Hybride " full " . . . . .	16
1.3.6 Hybride série . . . . .	16
1.3.7 Hybride parallèle . . . . .	17
1.3.8 Hybride série/parallèle . . . . .	19
1.3.9 Hybride complexe . . . . .	21
1.3.10 Hybride " plug-in " . . . . .	22
1.4 Motorisation de la chaine de traction . . . . .	23
1.4.1 Machines à courant continu (MCC) . . . . .	23
1.4.2 Moteur synchrone à rotor bobine (MSRB) . . . . .	24
1.4.3 Moteur synchrone à aimants permanents(MSAP) . . . . .	24
1.4.4 Moteur synchrone à reluctance variable (MSRV) . . . . .	24

1.4.5	Moteur asynchrone à cage d'écureuil (MAS) . . . . .	25
1.4.6	Machines asynchrones à double alimentation(MADA) . . . . .	25
1.4.7	Choix des moteurs électriques . . . . .	26
1.5	Batteries . . . . .	26
1.5.1	Batterie au plomb . . . . .	27
1.5.2	Batteries aux nickel-cadmium . . . . .	27
1.5.3	Batteries au lithium-ion . . . . .	28
1.5.4	Batteries lithium-polymères . . . . .	29
1.5.5	Batteries sodium-chlorure de nickel . . . . .	29
1.5.6	Batteries zinc-air . . . . .	30
1.5.7	Courbe de décharge d'une batterie . . . . .	30
1.6	Conclusion . . . . .	31
<b>2</b>	<b>Modélisation des différents éléments d'une chaine de traction d'un véhicule électrique</b>	<b>32</b>
2.1	Introduction . . . . .	32
2.2	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère abc	32
2.2.1	Hypothèses simplificatrices . . . . .	33
2.2.2	Equations électriques de la machine . . . . .	34
2.2.3	Equations mécaniques de la machine . . . . .	35
2.3	Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné dans le repère dq . . . . .	35
2.3.1	Transformation de Park . . . . .	35
2.3.2	Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné dans le repère de Park . . . . .	36
2.3.3	Choix du référentiel . . . . .	38
2.3.3.1	Référentiel lié au stator . . . . .	38
2.3.3.2	Référentiel lié au rotor . . . . .	38
2.3.3.3	Référentiel lié au champ tournant . . . . .	38
2.4	Modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de la simulation	39
2.5	Commande vectorielle . . . . .	39
2.6	Modélisation de l'onduleur de tension . . . . .	44
2.6.1	Modulation de largeur d'impulsions sinusoïdale MLI . . . . .	46
2.7	Modélisation du couple résistant . . . . .	47
2.8	Modèle électrique de la batterie . . . . .	50
2.8.1	Modèle idéal . . . . .	50
2.8.2	Modèle de Thevenin . . . . .	51

2.9 Conclusion . . . . .	52
<b>3 Commande couple-vitesse de la MADA intégrée dans un véhicule électrique</b>	<b>53</b>
3.1 Introduction . . . . .	53
3.2 Simulation du système . . . . .	54
3.2.1 Résultats de simulation . . . . .	54
3.2.1.1 Démarrage à vide . . . . .	54
3.2.1.2 Démarrage avec un couple résistant . . . . .	58
3.3 Conclusion . . . . .	66
<b>Conclusion Générale</b>	<b>68</b>
<b>Annexes</b>	<b>69</b>
<b>Glossaire</b>	<b>71</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>73</b>
<b>Résumé</b>	<b>77</b>

# Table des figures

1.1	Composants qui peuvent faire partie d'une chaine de traction . . . . .	4
1.2	Exemples des voitures électriques du début du <i>XIX<sup>me</sup></i> siècle . . . . .	5
1.3	Caractéristiques force-vitesse du VT à 5 rapports et du VE à rapport fixe . . .	7
1.4	Chaîne de traction électrique . . . . .	7
1.5	Exemple de VE commercialisés . . . . .	8
1.6	Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ; b) Roue motrice nouvelle génération BRIDGESTONE . . . . .	9
1.7	Véhicule électrique Maya 100 . . . . .	10
1.8	Comparaison de la densité d'énergie pour les différentes de batteries . . . . .	10
1.9	Transport de l'électricité par électrons ou à travers l'hydrogène . . . . .	11
1.10	Autonomie de différents types de voitures avec 100MJ d'énergie provenant du vent (tenant en compte le rendement global vent-roue) . . . . .	12
1.11	Classification des différents types de chaines de traction . . . . .	14
1.12	Chaîne de traction hybride série . . . . .	17
1.13	Renault Kangoo Electri'Cité&Elect'Road . . . . .	17
1.14	Chaîne de traction hybride parallèle . . . . .	18
1.15	Honda Civic IMA : a) ancien modèle ;b) modèle 2006 . . . . .	19
1.16	a) Chaîne de traction hybride série/parallèle ; b) power Split Device Toyota . .	19
1.17	Toyota Prius 1et son système motopropulseur " Toyota Hybrid systemó " . . .	20
1.18	Toyota Prius 2 et son système motopropulseur" Toyota Synergy Driveó " . . .	21
1.19	Chaîne de traction hybride complexe . . . . .	22
1.20	Toyota Previa Hybrid . . . . .	22
1.21	Courbe de décharge d'une batterie. . . . .	31
2.1	Représentation de la machine asynchrone à double alimentation . . . . .	33
2.2	Passage du repère triphasé au repère biphasé . . . . .	36
2.3	Principe du contrôle vectoriel . . . . .	40
2.4	Boucles de régulation des courants du stator et du rotor . . . . .	43

2.5	Schéma de commande d'une MADA totalement interfacée . . . . .	44
2.6	Onduleur triphasé à deux niveaux . . . . .	44
2.7	Principe de la MLI sinusoïdale . . . . .	46
2.8	Force de roulement sur la roue . . . . .	47
2.9	Force aérodynamique en fonction de la vitesse pour différentes valeurs du $C_x$ .	49
2.10	Forces longitudinales du véhicule . . . . .	49
2.11	Modèle idéal . . . . .	51
2.12	Schéma électrique équivalente du modèle de Thevenin . . . . .	51
3.1	Dispositif de commande global d'une MADA totalement interfacé . . . . .	53
3.2	Allures de la vitesse de rotation et la vitesse de référence . . . . .	54
3.3	Couple électromagnétique à vide (N.m) . . . . .	55
3.4	Courant de phase statorique (A) . . . . .	55
3.5	Courant de phase rotorique (A) . . . . .	56
3.6	Flux statorique direct (Wb) . . . . .	56
3.7	Flux statorique en quadrature (Wb) . . . . .	57
3.8	Puissances actives statorique et rotorique (W) . . . . .	57
3.9	Tension de la batterie . . . . .	58
3.10	Parcoure prier par la voiture . . . . .	58
3.11	Allures de la vitesse de rotation et de sa référence . . . . .	59
3.12	Allure des pulsations des courants statoriques et rotoriques . . . . .	59
3.13	Allures des couples électromagnétique et du couple résistant en fonction du temps . . . . .	60
3.14	Allures du courant et de la tension d'une phase statorique . . . . .	60
3.15	Agrandissement de la première partie de la figure 3.14 . . . . .	61
3.16	Agrandissement de la deuxième partie de la figure 3.14 . . . . .	61
3.17	Agrandissement de la troisième partie de la figure 3.14 . . . . .	62
3.18	Allure de la puissance active statorique et rotorique . . . . .	62
3.19	Allure de la puissance de la batterie . . . . .	63
3.20	Allure de flux statorique direct en fonction du temps . . . . .	63
3.21	Allure de flux statorique en quadrature en fonction du temps . . . . .	64
3.22	Allure de la tension de la batterie en fonction du temps . . . . .	64
3.23	Energie fournie par la batterie . . . . .	65
3.24	Allure de courant d'une phase statorique . . . . .	65
3.25	Allure de courant d'une phase rotorique . . . . .	66
3.26	Schéma bloc d'un processus régulé par un PI . . . . .	69

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre les configurations série, parallèle, et série/parallèle (source Toyota) . . . . .	21
1.2	Avantages et inconvénients des différents moteurs. . . . .	26
1.3	Caractéristiques des batteries au plomb. . . . .	27
1.4	Caractéristiques des batteries Ni-Cd. . . . .	28
1.5	Caractéristiques des batteries lithium ion. . . . .	28
1.6	Caractéristiques des batteries lithium polymères. . . . .	29
1.7	Caractéristiques des batteries Na-NiCl. . . . .	30
1.8	Caractéristiques des batteries zinc/air. . . . .	30
2.1	Paramètres de simulation . . . . .	50

# Introduction Générale

La qualité de vie s'améliore et l'homme d'aujourd'hui a accès à des conditions de vie inaccessibles aux siècles passés. Les possibilités actuelles sont donc uniques dans l'histoire de l'humanité. L'âge d'or de l'énergie fossile a mis à notre disposition une énergie abondante à faible coût. Elle a permis de propulser le développement de la technologie qui produit actuellement des innovations majeures en un temps de plus en plus court. Le monde de demain sera encore différent de celui d'aujourd'hui. Mais, les changements qui apparaîtront dans notre quotidien ne seront pas exclusivement dus aux avancées technologiques, mais seront également imposés par des mesures contraignantes provenant de la forte industrialisation des deux siècles passés. Ainsi, les préoccupations actuelles majeures concernant la pollution, la préservation de l'environnement mais aussi le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources fossiles sont des préoccupations qui n'existaient pas auparavant et qui produiront des modifications importantes dans notre quotidien.

Parmi ces changements qui doivent s'opérer, le véhicule thermique. En effet, aujourd'hui, ce dernier a atteint des niveaux de performances jamais égalés. le Confort des passagers, puissance du moteur qui peut atteindre des vitesses phénoménales, sécurité des personnes, la longévité du véhicule, la fiabilité et maîtrise de cette technologie, sont parmi les qualités qu'elle nous offre. Mais comme tout ce qui dépend de l'énergie fossile, elle a l'inconvénient de polluer l'environnement en émettant des gaz à effet de serre. D'où la nécessité de lui trouver une alternative.

Le véhicule électrique pourrait être cette alternative, si ce n'est quelques problèmes liés au stockage de son énergie. En effet, les performances des systèmes de stockage d'énergie nous laissent à désirer de par leur capacité de charge et durée de recharge (longue) et de décharge (courte). Sinon, elle peut nous offrir tout les avantages du véhicule thermique sans pour autant avoir ces inconvénients. Et parmi ceux la, elle est sans émission de gaz à effet de serre, silencieuse et facile pour l'entretien.

Les véhicules électriques d'aujourd'hui utilisent des machines spécifiques, et parmi elles on trouve, les machines à courant continu, les machines synchrones et plus particulièrement les machines synchrones à aimants permanents, à réluctance variable et les machines asynchrones

à cage.

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour diverses applications : en tant que génératrice pour l'énergie éolienne et en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage et la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime et pourquoi pas la traction des véhicules électriques. Cet intérêt est dû essentiellement au nombre de degrés de liberté qu'elle offre grâce à l'accessibilité à son rotor et donc à la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor.

L'objectif de notre travail est d'intégrer la MADA et de la faire fonctionner dans une large plage de variation de vitesse aussi bien pour le fonctionnement moteur que pour le fonctionnement générateur. La structure d'alimentation qu'on a choisi pour répondre à ces exigences est la structure où l'alimentation du côté de la machine est assurée par deux convertisseurs d'électronique de puissance (au stator et au rotor), ces deux convertisseurs sont alimentés par une batterie. Pour cela on répartit notre travail en trois chapitres : Le premier chapitre fera l'objet d'une recherche bibliographique : en premier lieu, des généralités sur les véhicules électriques et véhicules hybrides avec leurs avantages et inconvénients seront énoncés, en second lieu nous allons faire un bref aperçu des différentes machines électriques qui peuvent intervenir pour la traction des VE et enfin on présentera des généralités sur les batteries. Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de la MADA dans le repère abc, puis dans le repère de Park d'où on tirera un modèle sur lequel se basera notre simulation. Ensuite on lui appliquera la commande vectorielle à orientation de flux statorique. Puis on modélisera la structure du convertisseur de puissance. Enfin on fera le calcul du couple résistant de la chaîne de traction et on donnera le modèle électrique de la batterie.

Le troisième et dernier chapitre sera consacré aux résultats de simulation des différentes allures que peuvent prendre les réponses aux sollicitations auxquelles est soumise la chaîne de traction. Ces résultats seront commentés.

Une conclusion générale avec des perspectives seront données à la fin de ce mémoire pour une continuation éventuelle du présent travail.

---

# DIFFÉRENTES CLASSES DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET EXEMPLES DE RÉALISATIONS

---

## 1.1 Introduction

Les études sur la conception des véhicules à traction électrique sont motivées par la nécessité d'un changement radical dans le domaine du transport. En effet, les problèmes environnementaux et de consommation d'énergie sont au coeur de notre actualité. C'est pourquoi, un moyen de transport propre non émetteur de gaz à effet de serre est d'un enjeu mondial.

Le but principal de ce premier chapitre est de présenter les solutions actuelles envisagées par les constructeurs afin de répondre à ces problèmes à partir des technologies existantes. Il présente les différentes solutions envisagées dans le monde automobile pour répondre à cette problématique, tout en permettant simultanément de garder le niveau actuel de mobilité et de confort, voir même l'améliorer. [33] Les véhicules tout électriques possèdent de grands avantages par rapport aux véhicules traditionnels, représentant la solution idéale aux problèmes annoncés. En effet, ils sont :

- Sans émission de gaz à effet de serre (la production d'électricité est supposée propre) ;
- Avec un bon rendement de la chaîne de traction ;
- Permettent un freinage électrique avec récupération d'énergie ;
- Une conduite plus souple et silencieuse ;
- D'une conception simplifiée (suppression des boîtes de vitesse, etc.).

Pourtant, leurs désavantages coïncident avec les avantages des véhicules traditionnels : leur source d'énergie embarquée, les batteries, sont caractérisées par une faible densité d'énergie engendrant ainsi un véhicule aux faibles performances avec une autonomie réduite. Cette nature complémentaire des véhicules traditionnels et tout électrique souligne la nécessité d'un

compromis afin de bénéficier de leurs avantages en tentant de supprimer leurs inconvénients. Les véhicules tentant ce compromis sont appelés hybrides. [33].

Ce premier chapitre présente les véhicules à traction électrique en les divisant en deux grandes catégories : les véhicules tout électriques et les véhicules électriques hybrides. Après quelques rappels d'histoire, on présentera quelques exemples de réalisations soulignant les architectures utilisées, les problèmes rencontrés et les orientations prises par les concepteurs.

## 1.2 Véhicule tout électrique

La figure 1.1 présente les symboles des composants qui seront utilisés pour expliciter le principe des différentes chaînes de traction présentées.

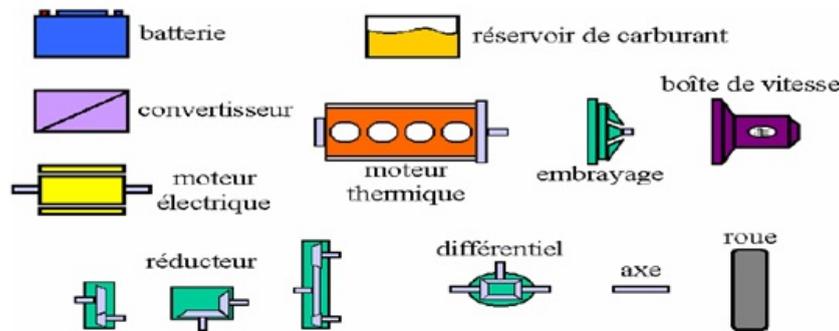


FIGURE 1.1 – Composants qui peuvent faire partie d'une chaîne de traction

Avec une présence importante au début de l'histoire de l'automobile, le véhicule tout électrique est réapparu ces derniers temps comme une solution potentielle au remplacement du véhicule conventionnel. Même s'il n'est pas encore en mesure de s'imposer sur le marché des véhicules particuliers, il reste sans conteste une bonne solution mais à la condition de disposer d'une source d'énergie embarquée performante. Les véhicules autonomes tout électriques utilisent la seule énergie électrique des batteries. Cette énergie est utilisée pour alimenter un ou plusieurs moteurs électriques de traction. [33]

### 1.2.1 Historique

L'histoire du véhicule électrique commença en Europe au début du XIXème siècle. Après l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique en 1821 par Faraday, la première voiture électrique a été construite en 1834 à Brandon, en Grande Bretagne, par un mécanicien nommé Thomas Davenport. Le petit véhicule fonctionnait sur une batterie non-rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur

rail [17] [31]. Puis, en 1859, le Français G. Planté inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable [26] et en 1869 Gramme construira le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un cheval. Douze ans plus tard, en 1881, Gustave Trouvé, réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire [26], [22]. Le véhicule était propulsé par un moteur électrique à courant continu de 0,1cheval et pesait 160kg avec son conducteur. D'après [17] il a été précédé par Sir David Salomons qui construisit un véhicule électrique avec une batterie rechargeable en 1874. Plus tard, en 1885, les allemands Daimler et Benz inventaient la première voiture à essence.

Les premières réalisations n'ont pas attiré l'attention du public due à leur technologie encore immature qui ne pouvait pas rivaliser avec les voitures à chevaux. Mais, les choses ont vite changé et dans les années qui ont suivi la course était lancée : les véhicules électriques rivalisaient avec les véhicules thermiques mais aussi avec les véhicules à vapeurs. A titre d'exemple, parmi les automobiles construites en 1900 aux Etats-Unis, 1575 étaient électriques, 1684 à vapeur et seulement 936 à essence [26].

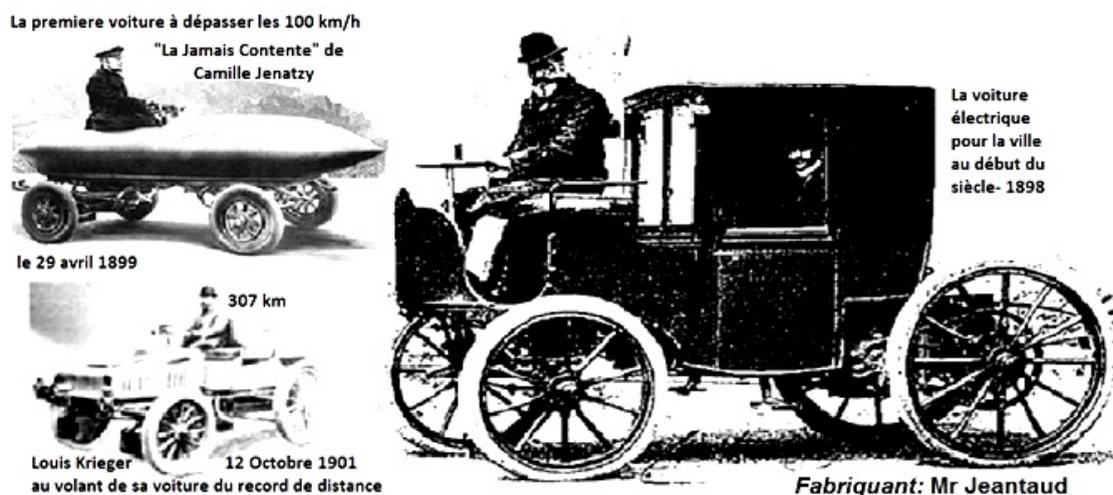


FIGURE 1.2 – Exemples des voitures électriques du début du  $XIX^{me}$  siècle

Sans doute, le début du  $XX^{ème}$  siècle a constitué l'âge d'or du VE. En effet, c'est un VE qui pour la première fois a franchi la limite de 100 km/h, le 29 avril 1899, avec le Belge Camille Jenatzy à bord de sa voiture baptisée " La Jamais Contente " en forme d'obus. Ce VE avait deux moteurs entraînant directement les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50 kW (soit 67 chevaux), alimentés par les 80 éléments de la batterie Fulmen pesant près de la moitié du poids total du véhicule de 1,5 tonne [31]. Deux ans plus tard, le 12 octobre 1901, l'ingénieur Français Louis Krieger effectuait, sans recharge, le voyage Paris-Châtellerauld soit 307 km à la vitesse moyenne de 17,5km /h. cette performance lui a valu un statut parmi les

plus importants constructeurs de véhicules électriques du début du siècle [10].

Le véhicule électrique était donc bien présent dans le monde de l'automobile. Notamment à l'occasion de l'exposition universelle de paris, en 1900, la ville est traversée par " des taxis à batteries amovibles, d'élégants et silencieux coupés, des fourgons postaux, des voitures de livraison et des véhicules de pompiers, fonctionnant tous à l'électricité " [10].

Cependant, l'amélioration continue des performances des véhicules à moteur à combustion interne, l'apparition de l'essence bon marché, et la persistance des limites qui affectent la capacité des batteries, font disparaître progressivement les VE du marché. Ainsi, au début des années 30, la production de véhicules électriques est presque complètement interrompue [26], la période 1921-60 étant dominée par les véhicules à moteur thermique. Dès lors les VE n'ont connu que des utilisations spécifiques. D'après [21] la dernière production significative de VE, d'un point de vue commercial, a été réalisée autour des années 1905.

De nouvelles possibilités vont apparaître en traction électrique après les années 1945, lorsque les laboratoires Bell inventent le transistor et plus tard, à l'apparition des thyristors capables de commuter des courants et des tensions élevées. Ces découvertes conduisent au développement de l'électronique de puissance qui permet le remplacement des rhéostats et la commande des moteurs à courant alternatif à fréquence variable [33].

En même temps, dans les années 60-90, à cause de la pollution atmosphérique et surtout des chocs pétroliers des années 70-80, de nombreux pays commencent à s'intéresser aux VE. Les recherches sont reprises et le VE commence à réapparaître en petit nombre. L'ère moderne du VE culmine entre les années 80-90 avec quelques véhicules comme l'EV1 réalisé par GM et la Peugeot 106 Electrique produit par PSA. Malgré les progrès, dans les années 90, il devient évident que les VE ne peuvent pas rivaliser avec les véhicules conventionnels à cause de leur autonomie et performances insuffisantes. Comme au début du XXème siècle, le frein à leur développement est, et reste, la source de stockage d'énergie, c.à.d. la batterie.

## 1.2.2 Réalisations

La solution la plus simple pour réaliser un VE est de le construire sur la base d'un véhicule thermique existant, en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique. Cependant, la transmission mécanique peut être simplifiée. La capacité des moteurs électriques à démarrer à couple élevé et de fonctionner sur une large plage de vitesse, comme présentée sur la figure 1.3, rend possible l'élimination de l'embrayage, voir même de la boîte de vitesse [33].

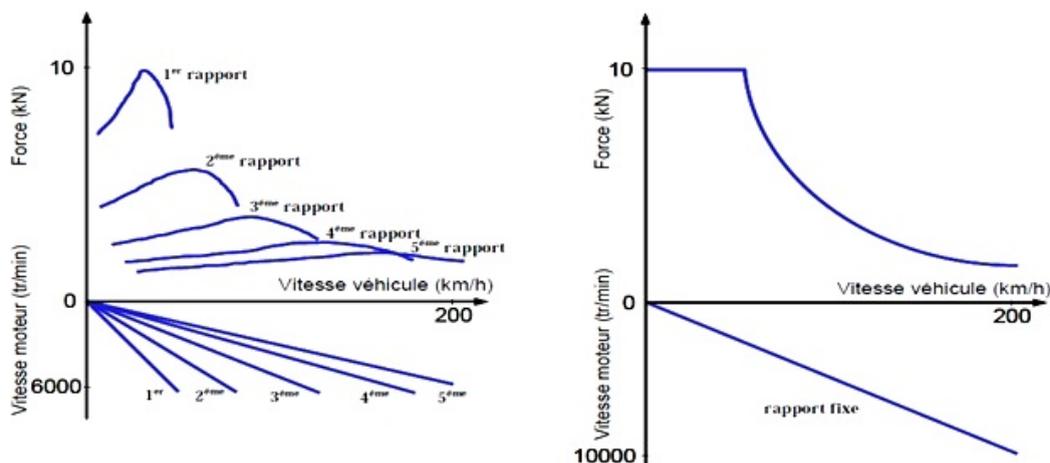


FIGURE 1.3 – Caractéristiques force-vitesse du VT à 5 rapports et du VE à rapport fixe

Par contre, comme le couple est une grandeur dimensionnante, l'absence de boîte de vitesse implique un moteur plus lourd, plus encombrant et donc plus coûteux. Aussi, pour réduire la masse embarquée, les VE peuvent être conçus avec un réducteur qui permet au moteur électrique de travailler à grande vitesse. Ce réducteur permet de réduire la taille du moteur grâce à la réduction du couple demandé. Cette chaîne de traction centrée autour d'un seul moteur de traction couplé à un réducteur à rapport fixe représente la solution dite classique pour l'architecture des VE. La chaîne de traction classique d'un VE comprend donc, la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique comprenant le différentiel et les roues. Cette configuration est présentée sur la figure 1.4.

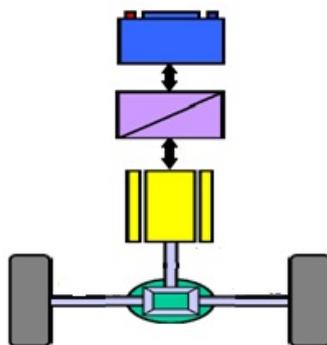


FIGURE 1.4 – Chaîne de traction électrique

### 1.2.2.1 Véhicules électriques commercialisés

Deux exemples de VE commercialisés en 2002 sont la Peugeot 106 Electrique et l'EV de GM présentées sur la figure 1.5. La 106 Electrique est entraînée par un moteur à CC à excitation

séparée fabriqué par l'entreprise Leroy-Somer d'une puissance nominale de 11kW. La puissance maximale s'élève à 20kW pour un couple max de 127Nm. Les batteries de traction choisies sont de technologie Nickel-Cadmium (NiCd), possédant une capacité de 100Ah sous 120V et sont produites par SAFT. Sa vitesse maximale est de 90km/h et atteint les 50km/h en 8,5s. Sa production a été progressivement arrêtée à cause toujours de son incapacité à rivaliser avec les voitures thermiques.



FIGURE 1.5 – Exemple de VE commercialisés

L'EV1 a été commercialisé à partir de 1997, avec une deuxième génération (G2) en 1999, étant disponible seulement en Californie et en Arizona. Ils ont été vendus à environ 800 exemplaires, mais doivent être retournés au constructeur après 3 ans d'utilisation. L'EV1 possède une autonomie maximale de 150km (G2 :210km) et une vitesse maximale de 128km/h (80miles) limitée par l'ordinateur de bord et pouvait être entièrement rechargé durant la nuit (6-8 heures). La première génération utilisait une batterie au plomb, 312V, 60Ah et la deuxième à NiMH, 343V, 77Ah. Un prototype d'EV1 a atteint en 1994 le record de vitesse de 295km/h pour un VE de production. Le programme a été arrêté en 2003 et un grand nombre de voitures ont été détruites [43].

### 1.2.2.2 Moteurs roues

La chaîne de traction tout électrique présentée ci-dessus, peut être encore simplifiée en utilisant un moteur pour chaque roue motrice. Ainsi, le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur.

Dans ce cas deux configurations sont possibles : soit les moteurs sont fixés au châssis donc suspendu, soit les moteurs sont fixés sur les roues formant ainsi ce qui est connu sous le nom de moteur-roue. Dans le premier cas la puissance est transmise sur les roues par des cardans. L'avantage de cette configuration est que la suspension isole les roues de la masse du moteur et la conduite du véhicule est plus facile. Dans le deuxième cas où les moteurs et les roues sont confondus la transmission est simplifiée. Mais, pour réduire au minimum les masses non suspendues, les moteurs-roue doivent avoir une forte puissance massique. À cause de ces contraintes, ces dernières sont relativement coûteuses limitant leur utilisation.

Concernant les moteurs-roue au moins deux configurations peuvent être envisagées : avec réducteur (figure 1.6 a) ou à entraînement direct (figure 1.6 b). Une réalisation d'un moteur-roue avec réducteur a été faite par Michelin, qui a présenté sa roue active (active wheel) lors du mondial de l'automobile en 2004. Elle intègre dans une roue un moteur électrique de traction, un frein à disque et une suspension électronique active située dans l'axe verticale de la roue. Très compacte, cette architecture nouvelle influe énormément sur celle du véhicule, qui n'a plus besoin de moteur, de boîte à vitesse, d'embrayage, de cardans, d'arbres de transmission mais aussi d'amortisseurs et de barres anti-roulis. En plus, elle agit telle une suspension active modifiant à tout instant l'assiette du véhicule pour assurer la tenue de route la mieux adaptée.

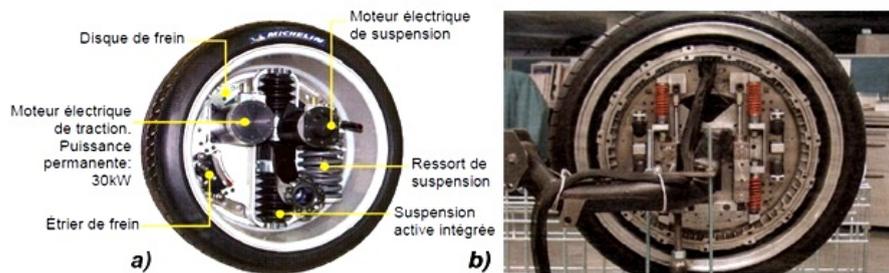


FIGURE 1.6 – Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ; b) Roue motrice nouvelle génération BRIDGESTONE

La présence d'un réducteur à rapport fixe a permis à Michelin d'utiliser un moteur de 30kW ayant un poids extrêmement faible de 5kg. Cependant, le moteur a besoin d'un système de refroidissement (eau ou air). L'ensemble, avec pneu basse résistance au roulement 195/45 R 17N ou R 18, ne pèse pas plus de 32 kg [27].

En ce qui concerne le moteur-roue sans réducteur, l'équipementier Bridgestone présente un nouveau concept d'entraînement : un moteur électrique intégré dans la roue est doté d'un système de suspension et d'amortissement. Bridgestone est parvenu à améliorer la sécurité et le confort en "suspendant" le moteur par quatre ressorts et deux amortisseurs et ainsi résoudre les problèmes de poids des parties tournantes nuisibles à la tenue de route. [33].

### 1.2.2.3 Véhicules électriques et source d'énergie embarquée

La question du stockage de l'électricité a mobilisé les scientifiques depuis déjà deux siècles et reste encore l'une des clés de l'évolution du système énergétique en général et du VE en particulier. Ainsi, si la traction électrique autonome est maintenant disponible, cette technologie bute sur les performances médiocres du stockage de l'énergie par batterie. L'autonomie des VE

reste généralement faible, couvrant essentiellement des petits trajets de type urbains. En outre, la recharge des batteries est lente et doit être généralement effectuée la nuit. Ces contraintes d'utilisation ont bloqué le marché du véhicule électrique à moins de 1000 véhicules vendus par an. Des batteries plus performantes et plus légères arrivent maintenant sur le marché, mais elles sont coûteuses et les progrès modestes.

Quelques constructeurs de batteries construisent des prototypes de VE afin de démontrer les nouvelles performances de leurs batteries. Par exemple, Electrovaya [22] [20], une entreprise canadienne fabriquant de batteries pour ordinateurs portables, met en avant les performances de ses batteries Lithium ion Super-Polymer. Le résultat est Maya 100, présenté sur la figure 1.7, une berline sportive commercialisée en Norvège et dans les pays limitrophes. D'après le concepteur, la voiture a une autonomie de 630 km et une vitesse maximale de 140km/h. La batterie utilisée a une capacité de 40 kWh sous 144 V et compose de modules de 100 Ah conçus spécialement. Elle offre une densité d'énergie approximative de 225 Wh/kg et de 475 Wh/litre avec une durée de vie d'environ 150.000 km.



FIGURE 1.7 – Véhicule électrique Maya 100

L'entreprise souhaite encore augmenter la densité d'énergie de ses batteries et atteindre les 330 Wh /kg et les 650Wh/litre comme le montre la figure 1.8. Une solution envisagée pour

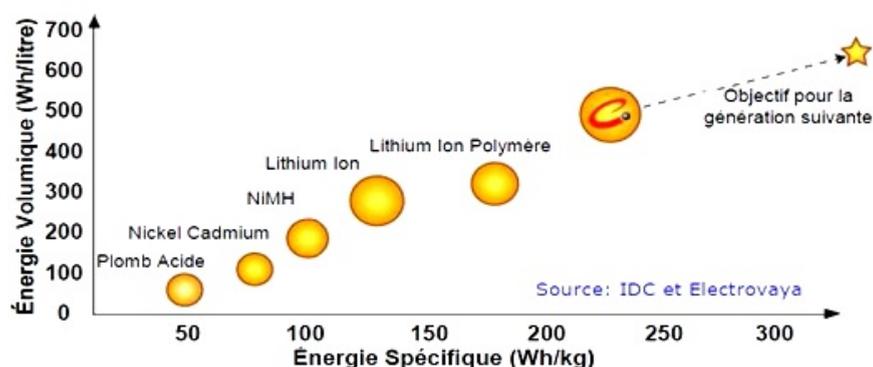


FIGURE 1.8 – Comparaison de la densité d'énergie pour les différentes de batteries

le stockage de l'énergie à bord des VE est la pile à combustible à base d'hydrogène. Les VE

comportant une telle source d'énergie embarquée sont appelées FCV (Fuel Cell Véhicule).

DaimlerChrysler et General Motors sont deux constructeurs fortement impliqués dans le développement de ces véhicules [31].

L'enthousiasme suscité par les voitures à hydrogène a fait long feu, mais, malheureusement, la situation n'est pas assez satisfaisante. En effet, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie car il doit lui-même être produit en utilisant d'autres sources d'énergie. Il est donc un intermédiaire énergétique, au même titre que l'électricité.

Ainsi, sa fabrication intervient dans le bilan énergétique et écologique. Sa fabrication peut se faire d'une manière conventionnelle engendrant une pollution ou d'une manière propre [33].

Dans le premier cas, utilisé actuellement, l'hydrogène est obtenu à partir de combustibles fossiles qui émettent du  $CO_2$  et d'autres polluants. Un usage massif de ce procédé aggraverait le réchauffement de la planète et ne résoudrait pas le problème de l'épuisement de ressources fossiles.

Dans le deuxième cas, pour être un combustible propre d'hydrogène doit être produit à partir d'énergies renouvelables. Mais, utiliser l'énergie électrique pour produire de l'hydrogène (par l'électrolyse de l'eau) qui à son tour sera utilisé pour produire de l'électricité représente un processus complexe et coûteux. D'après la figure 1.9, pour produire de l'électricité au bord du véhicule (disons 100%) à partir d'hydrogène, une quantité d'énergie électrique initiale 4 fois plus grande (400%) est requise. En effet, seulement la moitié de l'énergie électrique initiale arrive au véhicule sous forme d'hydrogène, et seulement la moitié de celle-ci sera transformée en énergie électrique, la meilleure pile à combustible ayant un rendement max de 50% [12]. Ainsi, d'après Ulf Bossel, le fondateur du Forum Européen de la Pile à combustible [33], l'hydrogène ne peut pas devenir une forme d'énergie dominante, car il ne peut pas rivaliser avec sa propre source d'énergie : l'électricité [14].

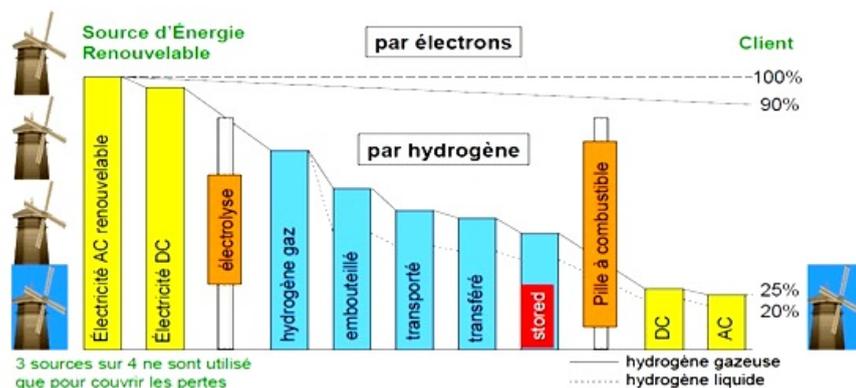


FIGURE 1.9 – Transport de l'électricité par électrons ou à travers l'hydrogène

En fait, la pile à combustible remplace la batterie comme élément de stockage avec l'avant-

tage de permettre au FCV une plus grande énergie stockée et donc une plus grande autonomie. Toutefois, si on se reporte à l'énergie initiale produite, le VE à batterie a une autonomie plus que double par rapport au FCV. La figure 1.10 présente différentes autonomies pour une même énergie initiale, le rendement énergétique de chaque solution crée la déférence.

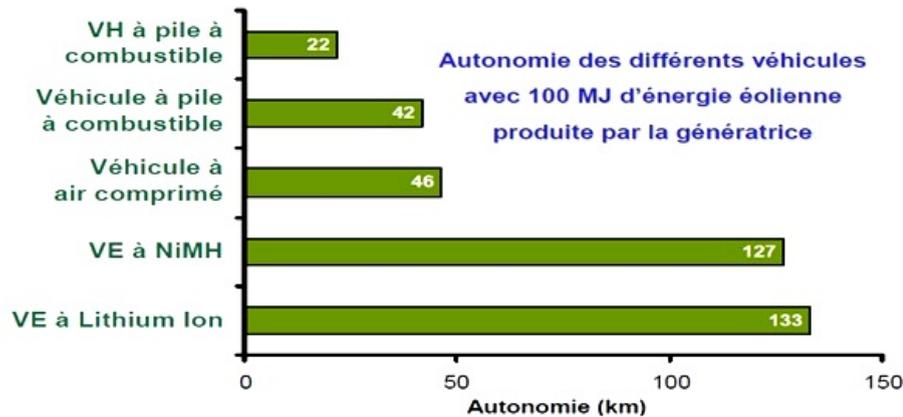


FIGURE 1.10 – Autonomie de différents types de voitures avec 100MJ d'énergie provenant du vent (tenant en compte le rendement global vent-roue)

## 1.3 Véhicule hybride

Pour palier au problème d'autonomie, d'autres solutions ont été investiguées. Ainsi, les constructeurs se sont orientés vers les véhicules électriques hybrides (VH). Ils représentent un compromis entre le véhicule traditionnel à moteur thermique et le VE. Leur but principal est de diminuer la pollution des véhicules conventionnels ou inversement d'augmenter l'autonomie de VE. Ils peuvent être vus comme solution intermédiaire, en attendant que les problèmes d'autonomie et d'infrastructure des VE soient résolus.

### 1.3.1 Historique

Même si le VH apparaît maintenant comme une solution aux faibles performances des VE actuel le concept de VH n'est pas nouveau. En effet, il est aussi vieux que l'automobile lui-même. A l'origine son but n'était pas de diminuer la consommation de carburant, mais surtout d'assisté les faibles performances des moteurs à combustion de l'époque.

Les premiers VH de type série ou parallèle ont été présentés à Paris au Salon de 1899. Le VH parallèle avait un petit moteur thermique refroidi par air, assisté par un moteur électrique et alimenté par des batteries au plomb. Le moteur électrique était utilisé dans le cas où la

puissance de traction dépassait la puissance du moteur thermique. Lors d'un stationnement ou d'un roulage au-dessous de la capacité du moteur thermique, la batterie était chargée par le moteur thermique.

Le premier VH série a été conçu pour augmenter l'autonomie d'un VE. Deux moteurs électriques entraînent séparément les deux roues arrière, la batterie étant rechargée par un moteur thermique de 3/4 chevaux couplé à un générateur de 1,1kW [21].

Ces deux types de véhicules ont été commercialisés jusqu'en 1914 avant de disparaître complètement, à cause de l'amélioration des moteurs à combustion interne.

Même si quelques études et prototypes de VH ont vu le jour avant [21], l'intérêt des constructeurs est réapparu dans les années 90, une fois convaincu que le VE ne pouvait pas, dans l'état de la technologie actuelle, remplacer les véhicules thermiques. Le plus gros effort de développement et de commercialisation a été fait par les constructeurs japonais. Ces efforts se sont concrétisés par des VH commercialisés apportant de réels gains en consommation. Le VH le plus connu est la Prius de Toyota commercialisée à partir de 1997 au Japon et suivie par la Prius 2 sortie en 2004. Honda avec son Insight et sa Civic Hybride est un autre pionnier dans le domaine. En effet Honda a été le premier constructeur automobile à commercialiser un VH en dehors du Japon et notamment en Amérique du Nord avec Insight en 1999. En 2002 il a été suivi par la Honda Civic Hybride, le véhicule hybride véritablement commercialisé [23] [34]. Aujourd'hui de plus en plus de VH apparaissent, comme la Ford Escape Hybride, la Lexus RX400h, GS45h et LS600hL ou le Toyota Highlander, etc. [33].

### 1.3.2 Définition et classifications

Les VH constituent une famille recouvrant une grande variété de solutions. Ainsi, une définition exhaustive des VH est assez difficile et la majorité des définitions sont incomplète. Une définition courante est celle proposée par le comité Technique 67(Electrique Road Véhicules) de la commission Internationale d'Electrotechnique [17] [24] : le VH est un véhicule dans lequel l'énergie de propulsion est fournie par deux ou plusieurs types de dispositifs de stockage, sources ou convertisseurs d'énergie, ou au moins un parmi eux fournit de l'énergie électrique. Une autre définition proposée par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) dans un rapport technique [41] : un VH a un groupe motopropulseur dans lequel l'énergie peut être transmise par au moins deux dispositifs de conversion d'énergie différents tirant l'énergie d'au moins deux dispositifs de stockages d'énergie différents. Néanmoins, ces définitions ne sont pas reconnues par tous les constructeurs car elles n'intègrent pas l'hybride " micro " présenté ci-dessous [45].

Une chaîne de traction peut être réalisée à partir de deux configurations principales, série ou parallèle, en pratique les solutions retenues sont souvent des combinaisons entre les deux

schémas. Toutefois, une classification souvent utilisée aujourd’hui propose une décomposition en quatre catégories principales en fonction notamment du niveau de l’hybridation [22] :

- Micro hybride
- Mild hybride
- Full hybride
- Plug-in hybride

Ainsi, le VH, dans le sens classique du terme, devient dans cette classification un " full hybride " laissant place à des configurations moins complexes comme les hybrides " micro " et " mild ". D’autre part, l’hybride " plug-in " s’intercale entre le " full hybride " et le VE. La figure 1.11, donne une image d’ensemble des solutions existantes pour créer une chaîne de traction et les situe sur un axe véhicule thermique-véhicule électrique.

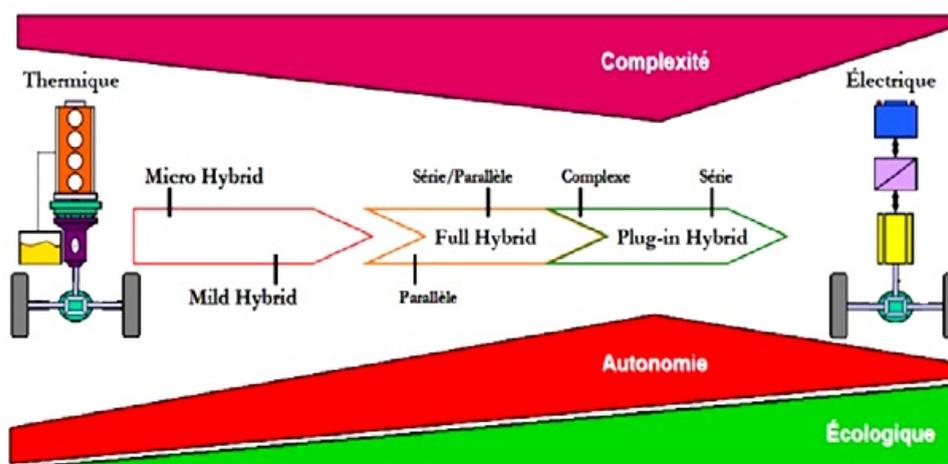


FIGURE 1.11 – Classification des différents types de chaînes de traction

La figure 1.11 permet de visualiser les quatre niveaux d’hybridation, ainsi que les différents hybrides " fulls " ou " plug-in " en fonction de l’architecture (série, parallèle, série/parallèle, complexe). Les hybrides " full " et " plug-in " sont liés afin de souligner qu’ils peuvent avoir la même architecture. Leurs différences viennent du fait que le VH " plug-in " peut être rechargé à partir d’une source électrique extérieure. Ces véhicules ont souvent une batterie plus grande, donc une autonomie plus importante en régime " zéro émission ", étant ainsi plus proche d’un VE. Plus la partie électrique prend importance, plus l’impact environnemental baisse. Par contre, la complexité augmente avec l’introduction successive de la traction électrique et commence à diminuer lorsque le moteur thermique cesse de participer à la traction, notamment dans la configuration série.

Les différents types d'hybrides et d'architectures exposés dans la figure 1.11 sont présentés ci-dessous.

Toutefois, il est possible d'imaginer d'autres classifications. D'après [22], il serait également intéressant de qualifier les VH, soit en fonction du nombre de kilomètres qu'ils peuvent parcourir en mode tout électrique (zéro émission), soit en fonction du pourcentage de la puissance électrique par rapport à la puissance totale disponible. Cela permet d'introduire un nouveau vocabulaire :

- VH20, pour 20km d'autonomie ;
- VH30%, pour 30% de puissance électrique par rapport à la puissance totale.

Ces classifications s'intègrent facilement dans le schéma de la figure 1.11, trouvant leur place entre les deux technologies situées aux extrémités.

### 1.3.3 Hybride " micro "

Connu aussi sous le nom de " light hybrid " ou " soft hybrid ", ce niveau d'hybridation s'apparente aux véhicules ayant la fonctionnalité " Stop&Go " appelé aussi " Stop&Start ". La caractéristique principale du " micro hybrid " est que l'ancien alternateur et démarreur du véhicule forment maintenant un seul moteur électrique appelé alterno-démarreur, capable de remplir les deux fonctions, celles de démarrer le moteur thermique et de charger la batterie. Cette configuration permet également de remplir la fonction " Stop&Go " représentant le premier niveau d'hybridation. Ainsi, les véhicules qui en sont équipés se mettent en " veille " dès que la vitesse tombe au-dessous de 6km/h, c.à.d. à l'approche d'un feu rouge ou dans un embouteillage. Au démarrage, le moteur repart automatiquement dès que le conducteur relâche la pédale de frein. Autre avantage, même si la traction est réalisée complètement par le moteur thermique la configuration " micro " permet de courtes périodes d'accélération où le moteur électrique intervient pour aider le moteur thermique.

En Europe, un tel système a été développé par Valeo et appliqué sur la Citroën C3 de PSA, il développe une puissance de 5kW sous 12V. Cette fonctionnalité est d'habitude présente aussi sur les véhicules de niveau d'hybridation plus élevé. Le " Stop&Go " permet de diminuer les nuisances sonores dans les zones urbaines et de réduire la consommation d'environ 10%.

Les constructeurs ayant opté pour l'hybride " micro " n'envisage pas de rester à ce niveau d'hybridation, mais le voie plutôt comme une première étape. Ainsi, chez Valeo, la prochaine étape est le freinage récupératif à l'aide de batteries de hautes performances ou de super condensateurs. Avec ce freinage Valeo espère gagner encore 5% sur la consommation. [33]

### 1.3.4 Hybride " mild "

La principale différence entre les hybrides " micro " et " mild " est l'alternateur-démarrateur, remplacé par un moteur électrique plus puissant capable d'accomplir de nouvelles tâches. Ainsi, la batterie étant de taille plus grande, le moteur électrique assiste le moteur thermique dans la traction, mais entraîne très rarement le véhicule tout seul. Une autre fonctionnalité importante de l'hybride " mild " est la possibilité de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors du freinage. Le moteur électrique est d'habitude branché sur le même arbre que le moteur thermique entre le moteur thermique et la boîte à vitesse. Cette configuration permet un gain de consommation entre 20% et 25% par rapport à une même voiture de même catégorie.[33]

### 1.3.5 Hybride " full "

Le " full hybrid " est équipé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique d'une puissance relativement équivalente. Ainsi, par rapport à la configuration " mild " le moteur électrique augmente en importance, et le moteur thermique moins dimensionné, fait connu sous le nom de " downsizing ". La batterie devient aussi plus grande et permet grâce au moteur électrique d'entraîner le véhicule en fonctionnement tout électrique (zéro émission). Ce mode de fonctionnement peut être sous le contrôle de la gestion électrique du véhicule ou sous le contrôle direct du contrôleur. Dans le premier cas, le fonctionnement tout électrique couvre des distances courtes aux vitesses faibles (Toyota Prius, Nissan Tino Hybrid) laissant la priorité à l'essence sur route ou quand la circulation est fluide. Dans le deuxième cas, le conducteur peut choisir un mode tout électrique pour des distances plus longues (20km ou plus), en général compatible avec l'usage urbain [9]. Le contrôle de tel système est complexe, mais l'amélioration du rendement global entraîne une diminution de consommation de 40% à 45%.

La variété des modes de fonctionnement d'un véhicule " full hybrid ", procure une importante flexibilité dans la gestion énergétique.

Les principales architectures pouvant constituer le " full hybrid " sont détaillées ci-après en commençant avec les architectures classiques, hybride série et parallèle, et en terminant avec l'hybride série /parallèle et l'hybride complexe, combinaison des deux précédentes[17].

### 1.3.6 Hybride série

La configuration série, présentée sur la figure 1.12 peut être vue comme un VE assisté par un moteur thermique. Elle a l'avantage d'être la configuration hybride la plus simple mais aussi le désavantage d'avoir trois machines alors qu'il n'y a qu'un seul moteur fournissant la puissance de propulsion.

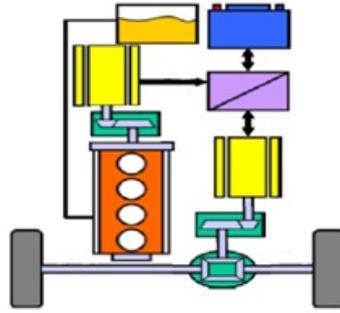


FIGURE 1.12 – Chaîne de traction hybride série

Le moteur thermique entraîne une génératrice pour produire de l'énergie afin d'assurer l'autonomie du véhicule. L'énergie ainsi générée peut charger la batterie ou alimenter directement le moteur électrique afin de propulser la voiture. Le désavantage principale de cette solution est la présence de 3 moteurs devant être sur dimensionnés sur parcours sévères. En général, la solution est adaptée pour les véhicules lourds comme les bus.

Un exemple de voiture commercialisée en France depuis 2003 [37], ayant un système ressemblant fort à la configuration série est la Renault Kangoo Elect'Road, présentée sur la figure 1.13.



FIGURE 1.13 – Renault Kangoo Electri'Cité&amp;Elect'Road

Le moteur de traction est un moteur synchrone à rotor bobiné piloté par un onduleur alimenté par une batterie NiCd 132V/100A. Le prolongateur d'autonomie contient un moteur thermique de 2 cylindres,  $500\text{cm}^3$ , avec une puissance de sortie de 16kW et deux alternateurs chacun fournissant 5,5kW à 132V et 5000 tr/min.

### 1.3.7 Hybride parallèle

L'hybride parallèle (ou dual) est caractérisé par deux motorisations assurant la propulsion. Comme présenté sur la figure 1.14, le moteur thermique et le moteur électrique sont placés en parallèle et sont liés mécaniquement afin que chacun puissent propulser la voiture indépendamment ou simultanément. L'hybride parallèle est plutôt un véhicule thermique assisté

par un moteur électrique afin de réduire les émissions du moteur thermique et d'optimiser la consommation de carburant. Le moteur électrique peut être utilisé comme générateur pour charger la batterie à partir du moteur thermique ou lorsque le véhicule est en régime de freinage. Le désavantage provient de la complexité du contrôle mais aussi du dispositif mécanique liant les deux moteurs. L'avantage par rapport à la configuration série, est que cette solution nécessite seulement deux moteurs de plus petite taille car tous deux participent à la traction. L'ensemble est donc plus compact que l'hybride série [33].

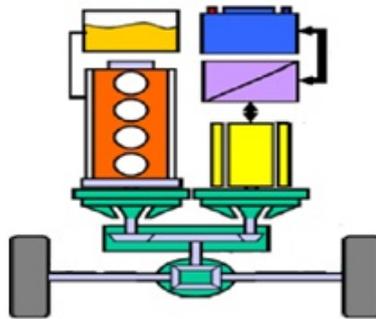


FIGURE 1.14 – Chaîne de traction hybride parallèle

Dans l'exemple du Honda Civic Hybrid, présenté sur la figure 1.15.a, les 2 motorisations sont liées par un arbre moteur. La figure 1.15 montre la motorisation, avec le moteur électrique placé entre le moteur thermique et la boîte de vitesses. Dans ce cas, le schéma de la figure 1.14 est simplifié, le véhicule ne pouvant pas fonctionner en régime tout électrique. De ce fait Honda Civic Hybride est classé dans la catégorie " Mild hybride ". Le moteur électrique brushless DC de 144V/57Nm n'intervient que dans des phases particulières :

- Lors de l'accélération ou de l'ascension d'une pente
- Lors d'une phase de récupération d'énergie
- Pour assurer la fonctionnalité " Stop&Go "

Cette solution entraîne un gain de consommation de 30% et permet de diminuer les rejets de  $CO_2$  à 109 grammes/km.



FIGURE 1.15 – Honda Civic IMA : a) ancien modèle ;b) modèle 2006

Cependant, la quatrième génération installée sur le Civic Hybride 2006 offrira également la possibilité d'une traction tout électrique. Ainsi, lors de conduite à très faible vitesse, le système peut utiliser uniquement le moteur électrique, le moteur à essence ou les deux. La puissance combinée des deux moteurs équivaut à 110 cv. L'économie de carburant est augmentée de 5% par rapport au modèle précédent et s'établit à 4,61ℓ aux 100km fournissant une autonomie de 1000km. La batterie a une tension de 158 V, et 27% plus puissante, 12% plus petite et peut être rechargée 14% plus vite que la génération précédente. Son espérance de vie est estimée à 200 000km et garantie 8 ans ou 130 000 km [34].

### 1.3.8 Hybride série/parallèle

A partir de ces deux configurations de base, d'autres configurations ont été réalisées. La combinaison la plus simple est l'hybride série/parallèle, présenté sur la figure 1.16 a, rassemblant les deux configurations classiques dans une solution qui incorpore les avantages des VH série et des VH parallèle.

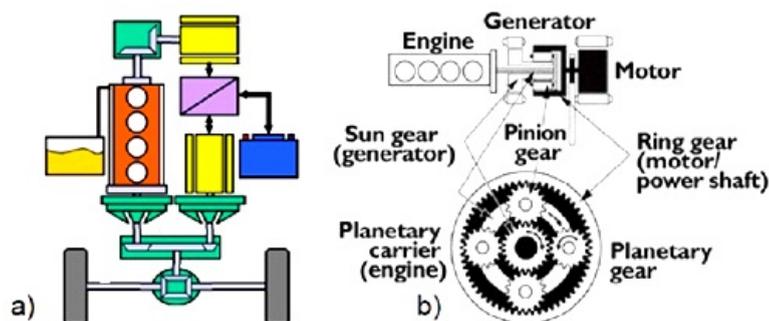


FIGURE 1.16 – a) Chaîne de traction hybride série/parallèle ; b) power Split Device Toyota

La complexité de cette configuration a augmenté, mais elle est adoptée par le VH le plus connu la Toyota Prius. La première génération, présentée sur la figure 1.17, a été lancée au Japon en 1997, puis aux Etats-Unis, en Europe, et dans les autres régions du monde à partir de l'année 2000. Le motopropulseur est connu sous le nom de Toyota Hybrid System (THS) et a comme originalité le composant appelé Power Split Device (figure 1.16 b) qui réalise l'accouplement entre le moteur thermique, la génératrice électrique et le moteur électrique. Ainsi, le VH peut fonctionner aussi bien avec le moteur électrique (33 kW), qu'avec le moteur thermique (53 kW) ou les deux simultanément, ce fonctionnement étant caractéristique pour la catégorie " Full Hybrid ".

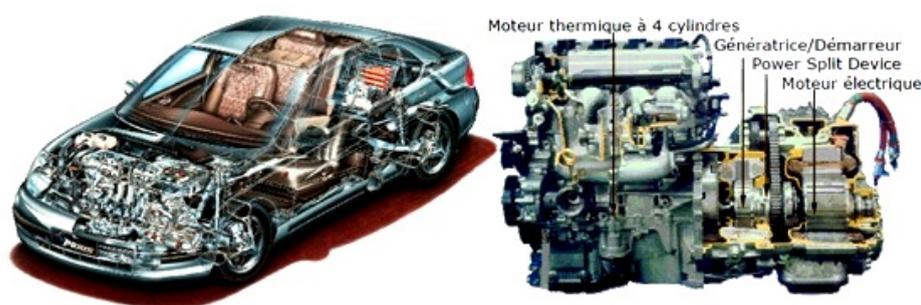


FIGURE 1.17 – Toyota Prius 1e et son système motopropulseur " Toyota Hybrid system "

La Toyota Prius première génération utilise un moteur thermique à 4 cylindres de  $1496\text{cm}^3$  et une machine synchrone de 33 kW. La batterie de traction est de technologie nickel-métal hydrure ( Ni-MH) à 288 V. Elle est rechargée par le moteur thermique ou lors des freinages récupératifs et sa durée de vie est égale à celle du véhicule. Les deux machines électriques sont des machines synchrones à aimant permanent d'une construction similaire, mais de dimensions différentes.

La seconde génération, présentée sur la figure 1.18, est commercialisée depuis 2003. La caractéristique innovante de son motopropulseur " Hybrid Synergy Drive " (HSD) provient de la présence d'un convertisseur de tension qui augmente la tension de la batterie afin d'obtenir un meilleur rendement et plus de puissance avec une batterie plus petite et plus fiable en durée. Ainsi, le véhicule est équipé d'un nouveau moteur électrique high voltage qui peut fonctionner jusqu'à 500V. D'une puissance de 50 kW, ce moteur électrique est piloté par une électronique de bord faisant moins souvent appel au moteur thermique. Il en résulte une diminution de la pollution de 30% par rapport à la Toyota Prius.



FIGURE 1.18 – Toyota Prius 2 et son système motopropulseur" Toyota Synergy Drive"

Une comparaison faite par Toyota entre les trois configurations d’hybride ci-dessus est présentée dans le tableau 1.1. Ce dernier met en évidence l’élimination des désavantages des configurations série et parallèle dans la configuration série/parallèle. Avec la Prius, Toyota a

TABLE 1.1 – Comparaison entre les configurations série, parallèle, et série/parallèle (source Toyota)

	Economie de carburant				Performances	
	Arrêt	Récupération d'énergie	Gestion de l'énergie	Rendement total	Accélération	Régime permanent
Série	●	○	●	●	○	○
Parallèle	●	●	○	●	●	○
Série/Parallèle	○	○	○	○	●	●

○ Excellent      ● Supérieur      ○ Défavorable

franchi une nouvelle étape et son succès incite les autres constructeurs à le suivre. Comparée aux citadines classique, la Prius produit 60% de moins de gaz à effet de serre, 90% de moins d’émissions polluantes et consomme 70% de moins de carburant [35].

### 1.3.9 Hybride complexe

La possibilité d’agencer les éléments dans une chaîne de traction hybride reste ouverte, d’autres possibilités de configurations peuvent encore apparaitre. Un autre exemple de chaîne de traction hybride qui n’est pas incluse dans les configurations mentionnées est l’hybride complexe.

La différence est située au niveau de la génératrice, qui dans le cas de l’hybride complexe peut également fonctionner en moteur avec la possibilité de participer à la traction. Cette configuration peut être appliquée pour entrainer les deux essieux, comme présenté sur la figure 1.19.

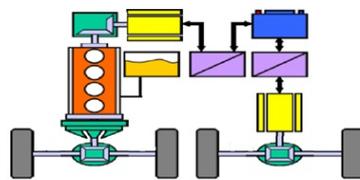


FIGURE 1.19 – Chaîne de traction hybride complexe

Cette configuration a été appliquée à la Toyota Pravia Hybrid (ou Estima Hybrid), présentée sur la figure 1.20, représentant le premier hybride à quatre roues motrice lancé en 2001 sur le marché Japonais. Il consomme 5,6 litres d'essence aux 100 km (sur cycle Japonais à 100 km/h), soit deux fois moins que la limite imposé par le gouvernement japonais pour un véhicule de cette catégorie pour 2010. Le véhicule bénéficie d'une autonomie d'environ 1000km et d'un niveau d'émission de 75% inférieur au seuil spécifié par les dernières réglementations [33].

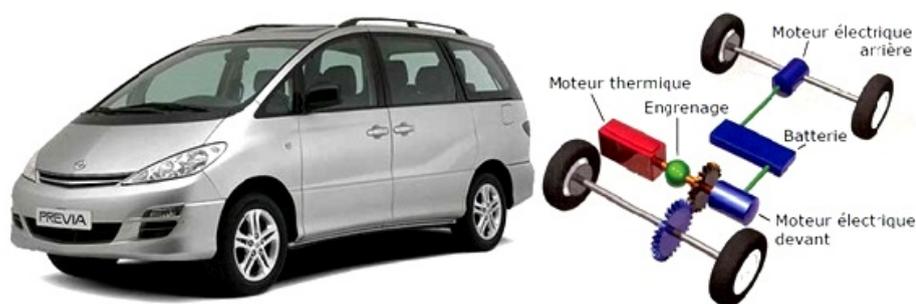


FIGURE 1.20 – Toyota Previa Hybrid

### 1.3.10 Hybride " plug-in "

Les années 2000 ont vu se développer le concept de VH de type " plug-in " appelé encore " gride-connected hybrid " ou plus couramment " PHEV " signifiant " plug-in hybrid electric véhicule " [46].

Ainsi, le PHEV est un hybride " full " avec comme caractéristique principale une capacité de batterie plus grande et la capacité de ce recharger à partir d'une prise conventionnelle 110V ou 220V. Son avantage principal, par rapport à l'hybride " full ", est de fournir une plus grande autonomie en mode tout électrique. Ainsi, il ne nécessite pas de carburant pour les trajets court et se comportent alors comme un VE.

A cause de sa batterie de plus grande capacité, le PHEV est plus cher qu'un hybride " full ". De plus, son système de contrôle est plus sophistiqué. D'un point de vue écologique, par

rapport aux hybrides " full ", les PHEV diminuent de moitié leurs émissions de  $CO_2$  et de plus de la moitié ses émissions polluantes [36]. La consommation de carburant diminue aussi, étant nulle pour un fonctionnement en tout électrique et comparable à l'hybride " full " pour un fonctionnement " mixte ".

## 1.4 Motorisation de la chaîne de traction

### 1.4.1 Machines à courant continu (MCC)

Actuellement les machines à courant continu et à courant alternatif se partagent le marché des variateurs. Le prix des machines électriques varie peu alors que celui des composants électroniques et micro-informatique a tendance à baisser, ce qui profite aux variateurs à courant alternatif. Cependant l'entraînement à courant continu garde encore une bonne place dans le marché de la haute performance. La machine synchrone à inducteur bobiné convient aux très fortes puissances, celle à aimants permanents au positionnement et aux faibles et moyennes puissances. La machine asynchrone se trouve dans les moyennes et fortes puissances [47]. Le moteur à courant continu à collecteur (MCC) et surtout à excitation indépendante confère, encore actuellement, la solution la plus économique grâce à son convertisseur d'induit de type hacheur à deux interrupteurs (l'inducteur est aussi alimenté par un hacheur de petite puissance). C'est la technologie retenue par de nombreux constructeurs automobiles pour la commercialisation des véhicules électriques de première génération. Mais le MCC possède un certain nombre d'inconvénients bien connus et il sera très probablement remplacé par des moteurs à commutation électronique dans les générations suivantes. Citons quelques-uns de ces inconvénients [47].

- L'usure des balais, voir du collecteur, nécessite un entretien périodique et produit des poussières conductrices qui finissent par nuire à l'isolement du collecteur lui-même et de l'induit ;
- La commutation mécanique nécessite des pôles de commutation et des enroulements de compensation qui accroissent le volume ;
- L'induit tournant, source des pertes principales, ne permet pas un refroidissement efficace, à l'eau par exemple, ce qui limite les possibilités de hautes performances ;
- La vitesse périphérique du collecteur et de l'induit est limitée à 50 voir 75 m/s ce qui ne permet pas d'atteindre les vitesses élevées nécessaires à une puissance massique convenable.

- Si l'excitation est à aimants, il n'est pas possible de fournir la puissance maximale (ce type de fonctionnement permet la suppression de la boîte de vitesses) sur une plage de vitesse étendue (il faudrait pouvoir décaler les balais, etc).

### 1.4.2 Moteur synchrone à rotor bobine (MSRB)

Généralement alimenté par un onduleur en pont à six transistors. C'est le moteur dont les caractéristiques se rapprochent le plus de celles du MCC à excitation indépendante, il permet d'optimiser facilement le rendement (action sur le flux et le courant d'induit). Enfin, le fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse. Son rotor bobiné est cependant source de pertes et sa vitesse maximale est limitée à 130 m/s environ[47].

### 1.4.3 Moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor (en surface insérés ou non pièces polaires, "enterrés" avec ou sans concentration de flux). Si l'objectif est d'obtenir un fonctionnement à puissance constante, il est nécessaire d'avoir une réaction d'induit importante (judicieusement optimisée) et il est nécessaire d'avoir des aimants "enterrés" ou insérés entre des pièces polaires. Le rendement de tels moteurs est excellent à condition de disposer d'aimants à hautes performances. La technologie Samarium Cobalt ne semble pas avoir un coût compatible avec l'industrie automobile et la technologie Fer-Néodyme-Bore doit encore faire quelques progrès en ce qui concerne la tenue en température et le prix. Ce dernier type d'aimants constitue un espoir important dans le domaine des moteurs électriques. Quant aux ferrites, dont le prix est acceptable en production de grande série, ils confèrent des performances relativement modestes aux MSAP mais ne sont pas à exclure. Les MSAP sont souvent retenus pour les appareils de mesure de précision, robots industriels, machine outils, l'entraînement de véhicules électriques et, particulièrement pour les entraînements directs de roue. Il est toujours alimenté à travers un onduleur triphasé[47].

### 1.4.4 Moteur synchrone à reluctance variable (MSRV)

Constitue une solution développée par FIAT. Il s'agit d'un moteur synchrone à bobinage triphasé réparti et alimenté par onduleur triphasé en pont classique. Pour obtenir des performances satisfaisantes aussi bien en terme de couple/pertes, de facteur de puissance que de plage de fonctionnement à puissance maximale constante, il est nécessaire d'avoir un grand

rapport des inductances directes sur transverses. Un rapport supérieur ou égal à 10 (satisfaisant) est atteint grâce à la construction de rotors spéciaux dits "axialement laminés". De tels rotors sont constitués de paquets de tôles intercalés entre des couches amagnétiques et montés axialement de telle façon que le flux, dans l'axe direct, passe aisément d'un pôle à l'autre. Les performances de ces moteurs sont supérieures à celles des moteurs asynchrones mais cette technologie de rotor reste aujourd'hui délicate à réaliser et il reste à trouver des solutions pour la fabrication en série [47].

#### 1.4.5 Moteur asynchrone à cage d'écureuil (MAS)

Son alimentation aussi est effectuée par un onduleur triphasé, est une solution envisagée par de nombreux constructeurs car ce moteur est bien connu et, surtout on possède l'expérience de sa fabrication en série. Le contrôle vectoriel permet d'obtenir de bonnes performances et ceux pour des vitesses élevées jusqu'à l'arrêt, et associé à un contrôle approprié du flux, le rendement peut être optimisé. Son rendement est moins bon que celui des moteurs synchrones à cause des pertes Joule. Le "fonctionnement à puissance constante" est aussi possible mais la plage de vitesse est limitée par le rapport du couple maximal (sommet de la caractéristique de couple à flux maximal) sur le couple "nominal". Cette contrainte conduit, quelque fois, à utiliser le moteur en couple (nominal) pour étendre sa plage de vitesse [47].

#### 1.4.6 Machines asynchrones à double alimentation(MADA)

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc. Pour des applications moteur, la machine asynchrone à cage occupe certes la première place, néanmoins la MADA alimentée par deux convertisseurs présente, notamment pour des applications de grandes puissances, de bonnes performances : fonctionnement en survitesse (jusqu'à deux fois la vitesse nominale) sans démagnétisation, bonnes performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur de vitesse, etc. Par ailleurs, la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine [29].

### 1.4.7 Choix des moteurs électriques

Le choix du moteur dépend fortement de l'application désirée et selon le cahier de charges défini. En général c'est le couple qui définira le type de moteur. Dans la gamme des moteurs alternatifs, le choix est vaste avec les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à rotors bobinés, à aimants permanents ou à réluctance variable. Le tableau (1.2) présente pour chacun d'entre eux, les machines génériques associées argumentées de leurs avantages et inconvénients [47] :

TABLE 1.2 – Avantages et inconvénients des différents moteurs.

Type du Moteur	Inconvénients	Avantages
Moteur asynchrone à cage d'écureuil	Rendement, pertes Joule au rotor, électronique coûteuse et commande complexe	Fabrication maîtrisée, puissance massique élevée, moteur robuste, montée en survitesse aisée
Moteur synchrone à rotor bobiné	Fragilité des bagues-balais	Bon rendement, puissance massique élevée
Moteur synchrone à réluctance variable	Surdimensionnement de l'alimentation, bruit et vibrations, ondulations de couple	Coût moindre, montée en survitesse aisée
Moteur synchrone à aimants permanents	Ondulations de couple, coût des aimants, technologie coûteuse, survitesse pénalisante	Technologie devenue courante, puissance massique élevée, pas d'échauffement au rotor
MADA	La présence de balais/bagues plus volumineuse qu'une MAS	Fonctionnement en survitesse sans démagnétisation jusqu'à deux fois nominale

## 1.5 Batteries

L'exigence de l'utilisation des voitures électriques a permis de réfléchir au fonctionnement de tout système de stockage d'énergie et au comportement de ce dernier. Ceci nécessite l'élaboration d'un modèle électrique permettant de rapprocher la nature chimique de la batterie vers

un modèle qui doit prendre en considération la dynamique et la non linéarité du système. Ce modèle doit être capable de simuler et d'estimer, en temps réel, les différentes variables et les paramètres du modèle [19].

### 1.5.1 Batterie au plomb

Comme il a été mentionné plus avant, la batterie au plomb a toujours été la source d'énergie la plus répandue pour les véhicules électriques. Ses premières applications pratiques remontent déjà à la fin du siècle passé, et son usage s'étend du démarrage des moteurs à combustion interne aux batteries de secours dans les hôpitaux. Sa technologie est bien maîtrisée, et elle est presque entièrement recyclable. Elle présente l'avantage non négligeable de présenter le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connus. Malgré son grand âge, il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle chimique ou électrique permettant de reproduire assez précisément et dans divers cas de figure son fonctionnement. Les seuls modèles disponibles sont soit assez imprécis, soit seulement utilisables dans certaines conditions d'utilisation bien précises.  $PbO_2$  est l'électrode positive (cathode, pôle +) et Pb l'électrode négative (anode, pôle-), tant en charge qu'en décharge.

TABLE 1.3 – Caractéristiques des batteries au plomb.

Température de fonctionnement [°C]	0 → 45
Energie spécifique théorique [Wh/kg]	170
Densité d'énergie [Wh/kg]	30 → 40
Puissance spécifique (à 80% DOD)[Wh/kg]	60 → 130
Temps de charge [h]	7 → 9
Coefficient de surcharge admissible[%]	5 → 20
Rendement énergétique [%]	65 → 85
Tension par cellule chargée [V]	2,1

Afin d'obtenir la tension désirée aux bornes d'un élément, on connecte plusieurs cellules en série à l'intérieur du module ; par contre, si l'on désire augmenter la capacité et le courant, il faut connecter ces cellules en parallèle [19].

### 1.5.2 Batteries aux nickel-cadmium

Celles-ci ont un fonctionnement tout à fait similaire aux batteries au plomb, si ce n'est que le couple  $Pb/PbO_2$  est cette fois remplacé par le couple Ni/Cd. Les systèmes à base de nickel

présentent les avantages sur les systèmes au plomb d'avoir une grande puissance, longue durée de vie, énergie volumétrique et densité de puissance relativement élevées [19].

TABLE 1.4 – Caractéristiques des batteries Ni-Cd.

Température de fonctionnement [°C]	0 → 50
Energie spécifique théorique [Wh/gk]	236
Densité d'énergie [Wh/kg]	45 → 65
Puissance spécifique (à 80% DOD)[Wh/kg]	100 → 180
Temps de charge [h]	5 → 8
Coefficient de surcharge admissible[%]	10 → 15
Rendement énergétique [%]	70 → 80
Tension par cellule chargée [V]	1,35

### 1.5.3 Batteries au lithium-ion

Ces batteries font partie des nouveaux types fort prometteurs. Leurs énergies massique et volumique sont très élevées, de l'ordre de respectivement 150 Wh/kg et 300 W/kg. Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'une batterie.

TABLE 1.5 – Caractéristiques des batteries lithium ion.

Température de fonctionnement [°C]	Ambiante
Energie spécifique théorique [Wh/kg]	275
Densité d'énergie [Wh/kg]	90 → 150
Puissance spécifique (à 80% DOD)[Wh/kg]	150 → 300
Temps de charge [h]	12 → 24
Coefficient de surcharge admissible[%]	1 → 2
Rendement énergétique [%]	85 → 95
Tension par cellule chargée [V]	3,2

Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité, d'où le nom "lithium carbone" ou "lithium ions" donné à ce

type d'accumulateurs. Lors de la décharge, la structure en carbone de l'anode libère alors ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode [19].

#### 1.5.4 Batteries lithium-polymères

Afin d'augmenter la densité d'énergie ainsi que la sécurité et la durée de vie des batteries au lithium, les chercheurs ont imaginé de remplacer l'électrolyte liquide par un électrolyte solide. Cela permet d'éviter les risques de contact direct anode/cathode et également de supprimer la matrice d'insertion en carbone qui limite la quantité d'énergie d'une batterie lithium-ion. Ces batteries sont par conséquent fort compactes et présentent une énergie massique élevée (de l'ordre de 170 Wh/kg) [19].

TABLE 1.6 – Caractéristiques des batteries lithium polymères.

Température de fonctionnement [°C]	Ambiante
Energie spécifique théorique [Wh/kg]	275
Densité d'énergie [Wh/kg]	150 → 200
Puissance spécifique (à 80% DOD)[Wh/kg]	150 → 200
Temps de charge [h]	12 → 24
Coefficient de surcharge admissible[%]	1 → 5
Rendement énergétique [%]	90 → 95
Tension par cellule chargée [V]	3, 2

#### 1.5.5 Batteries sodium-chlorure de nickel

Cette batterie, parfois appelée "batterie chaude", présente la caractéristique de ne pouvoir fonctionner qu'à des températures élevées, de l'ordre de 300 °C. Cela présente des avantages et des inconvénients.

La haute température implique que l'on dispose en permanence d'une forte source de chaleur pour chauffer l'habitacle du véhicule (environ 10 Wh/kg disponibles sous forme thermique) mais en plus que l'on doit maintenir cette température même à l'arrêt. Une partie de l'énergie de la batterie est donc dépensée pour conserver sa température, alors qu'en elle-même, elle ne présente pas d'auto-décharge [19].

TABLE 1.7 – Caractéristiques des batteries Na-NiCl.

Température de fonctionnement [°C]	270 → 350
Energie spécifique théorique [Wh/kg]	794
Densité d'énergie [Wh/kg]	700 → 90
Puissance spécifique (à 80% DOD)[Wh/kg]	100 → 180
Temps de charge [h]	7 → 10
Coefficient de surcharge admissible[%]	1 → 2
Rendement énergétique [%]	80 → 90
Tension par cellule chargée [V]	2,58

### 1.5.6 Batteries zinc-air

Ce type d'accumulateur n'est pas à proprement parler une batterie mais est plutôt une pile. En effet, il est impossible de le recharger via le secteur ou une source de courant. La recharge consiste en une série de processus mécaniques et électrochimiques qui requièrent une infrastructure particulière. Il est cependant mentionné ici car il présente une approche forte intéressante, relativement différente des systèmes classiques, et de bonnes performances [19].

TABLE 1.8 – Caractéristiques des batteries zinc/air.

Température de fonctionnement [°C]	Ambiante
Energie spécifique théorique [Wh/kg]	1350
Densité d'énergie [Wh/kg]	200 → 250
Puissance spécifique (à 80% DOD)[Wh/kg]	120 → 170
Temps de charge [h]	N/A
Coefficient de surcharge admissible[%]	N/A
Rendement énergétique [%]	N/A
Tension par cellule chargée [V]	1,65

### 1.5.7 Courbe de décharge d'une batterie

Une courbe de décharge typique est composée de trois sections, comme le montre la figure 1.21 :

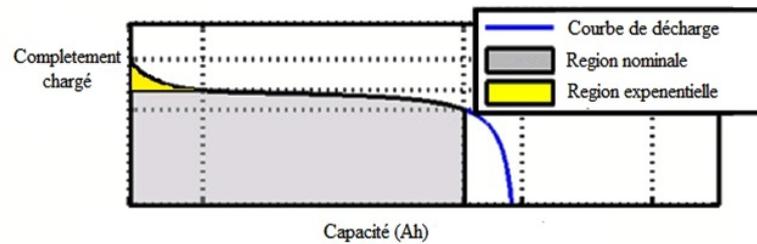


FIGURE 1.21 – Courbe de décharge d'une batterie.

- La première partie représente la chute exponentielle de tension lorsque la batterie est chargée. Selon le type de batterie, cette zone est plus ou moins large.
- La deuxième partie représente la charge qui peut être extraite de la batterie jusqu'à ce que la tension soit inférieure à la tension nominale de la batterie.
- Enfin, la troisième partie représente la décharge totale de la batterie, lorsque la tension chute rapidement.

## 1.6 Conclusion

Pour garder nos habitudes en terme de mobilité, il est impératif de trouver de nouveaux moyens de transport indépendants des énergies fossiles et sans rejet de gaz à effet de serre. La fin d'une énergie "abondante" et bon marché fait que les systèmes consommateurs d'énergie, comme les véhicules thermique doivent être remplacés par d'autres moyens. Les VE semblent être une bonne solution en termes de transport au problème d'émissions des gaz à effet de serre et de l'épuisement des ressources fossiles. Dans le premier chapitre, nous avons présenté un bref historique et un aperçu sur les véhicules électriques et hybrides. Leurs différentes architectures ainsi que les modèles qui existent actuellement. Nous avons ensuite présenté les différents machines qui peuvent être utilisées dans les véhicules électriques, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Et enfin, nous avons présenté différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques, leurs caractéristiques dont la durée de vie, leurs capacités de charge et l'allure que peut prendre la tension de décharge d'une batterie. Dans le deuxième chapitre, nous allons modéliser notre système qui se compose de la MADA, les convertisseurs d'électronique de puissance, les roues du véhicule et la batterie.

---

# MODÉLISATION DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS

## D'UNE CHAÎNE DE TRACTION D'UN

### VÉHICULE ÉLECTRIQUE

---

## 2.1 Introduction

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques [8].

Ce chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le référentiel lié au champ tournant. En effet, dans un premier temps on modélisera la machine dans un repère triphasé (a,b,c) et on introduit la transformation de Park qui nous permettra de passer du système triphasé au système biphasé sur lequel on se basera pour simuler le modèle de la machine. Ensuite nous allons décrire une stratégie linéaire de pilotage de la MADA, il s'agit d'un contrôle vectoriel à orientation de flux qui permet d'obtenir un contrôle séparé du flux et du couple. Puis on termine par la modélisation de l'alimentation de la machine c.à.d. la batterie et les convertisseurs d'électronique de puissance.

## 2.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère abc

La figure 2.1 illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle  $p=1$ . Souvent la machine est construite avec plusieurs paires de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines sont décalées de  $120/p$ . Dans ce cas la machine donne un couple plus grand et une vitesse de rotation réduite. [1].

as, bs, cs : phase du stator. Ar, Br, Cr : phase du rotor.

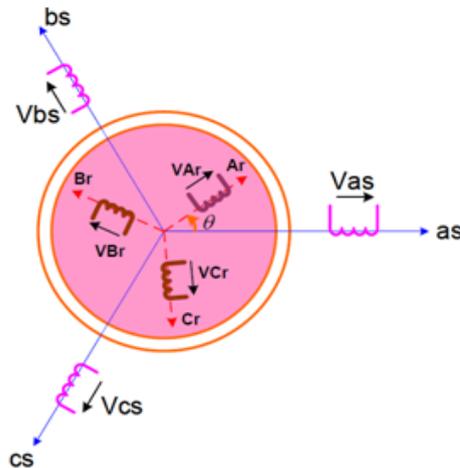


FIGURE 2.1 – Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

### 2.2.1 Hypothèses simplificatrices

La MADA, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont [16] :

- La machine est de constitution symétrique ;
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire) ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température. On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants ;
- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale ;
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

### 2.2.2 Equations électriques de la machine

Avec les hypothèses citées ci dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (2.1)$$

$$[V_r] \neq 0$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (2.2)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{Ar} \\ V_{Br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Avec :  $R_s, R_r$  Resistances des enroulements statoriques et rotoriques respectivement.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Ou  $l_s, l_r$  : Inductances de fuite statoriques et rotoriques respectivement ;

$M_s, M_r$  : inductances mutuelles. La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

En remplaçant (2.2) dans (2.1), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$T_{em} = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (2.5)$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = T_{em} - T_r - f_r \Omega \quad (2.6)$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de  $\theta$  (angle de rotation de la machine).

## 2.3 Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné dans le repère dq

### 2.3.1 Transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [5]. L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux : courants, tensions, et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants. La figure 2.2 illustre cette transformation. La matrice de transformation est définie par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 4\frac{\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & -\sin(\theta - 4\frac{\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Le fait que  $[P(\theta)]$  soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T$$

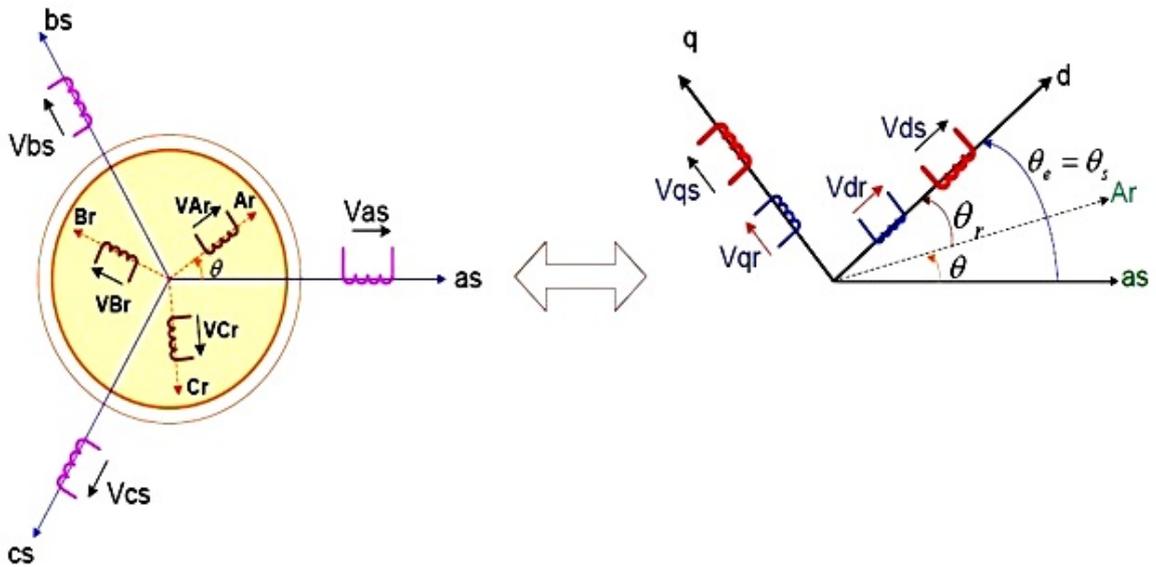


FIGURE 2.2 – Passage du repère triphasé au repère biphasé

### 2.3.2 Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné dans le repère de Park

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{r,ABC}] \\ [i_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [i_{s,abc}] \\ [i_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [i_{r,ABC}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} [\phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\phi_{s,abc}] \\ [\phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\phi_{r,ABC}] \end{cases}$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} [\phi_{ds}] = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ [\phi_{qs}] = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} [\phi_{dr}] = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ [\phi_{qr}] = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (2.9)$$

Tel que :

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2}M_{sr} = \frac{3}{2}M_{rs}$  : Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_e \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_e \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_e - \omega) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_e - \omega) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad \text{Avec : } \theta_s = \theta + \theta_r$$

### 2.3.3 Choix du référentiel

#### 2.3.3.1 Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

#### 2.3.3.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega_e = \omega$ . Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

#### 2.3.3.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega_e = \omega_s$ . Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.13)$$

Les équations mécaniques sont :

$$\begin{cases} T_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{ds} \cdot i_{dr}) \\ \frac{J}{p} \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_r - T_f \end{cases} \quad (2.14)$$

## 2.4 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de la simulation

Le système d'équations (2.12) et (2.13) représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (dq) lié au champ tournant. On remplace le système d'équations (2.8) et (2.9) dans le système (2.12) et (2.13) on obtient le système d'équations (2.15) et (2.16) suivant

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + M \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_s (L_s i_{sq} + M i_{rq}) \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + M \frac{d}{dt} i_{rq} + \omega_s (L_s i_{sd} + M i_{rd}) \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + M \frac{d}{dt} i_{sd} - (\omega_s - \omega_r) (L_r i_{rq} + M i_{sq}) \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + M \frac{d}{dt} i_{sq} + (\omega_s - \omega_r) (L_r i_{rd} + M i_{sd}) \end{cases} \quad (2.15)$$

D'où on tire les expressions différentielles des courants

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{L_s} (V_{sd} - R_s i_{sd} - M \frac{d}{dt} i_{rd} + \omega_s (L_s i_{sq} + \omega_s M i_{rq})) \\ \frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{L_s} (V_{sq} - R_s i_{sq} - M \frac{d}{dt} i_{rq} - \omega_s (L_s i_{sd} - \omega_s M i_{rd})) \\ \frac{d}{dt} i_{rd} = \frac{1}{L_r} (V_{rd} - R_r i_{rd} - M \frac{d}{dt} i_{sd} + (\omega_s - \omega_r) L_r i_{rq} + (\omega_s - \omega_r) M i_{sq}) \\ \frac{d}{dt} i_{rq} = \frac{1}{L_r} (V_{rq} - R_r i_{rq} - M \frac{d}{dt} i_{sq} - (\omega_s - \omega_r) L_r i_{rd} - (\omega_s - \omega_r) M i_{sd}) \end{cases} \quad (2.16)$$

## 2.5 Commande vectorielle

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancés en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations; ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique [4]. Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus primaire est celui des courants et donc du couple, puisque l'on a vu que le couple pouvait s'écrire directement en fonction des courants :

$$T_{em} = pM(i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (2.17)$$

Une fois que l'on maîtrise la régulation du couple, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. On parle alors de régulation en cascade; les boucles sont imbriquées l'une dans l'autre. Il est évident que pour augmenter la vitesse, il faut imposer un

couple positif, pour la diminuer il faut un couple négatif. Il apparaît alors clairement que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit à son tour être imposé par l'application des courants ; c'est le rôle des régulateurs de courants. [4]

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. On se retrouve confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple. La commande vectorielle vient régler ce problème de découplage.

Il existe plusieurs types de contrôles vectoriels, nous n'aborderons que la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique. Mais d'abord le principe de la commande vectorielle.

Le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère dq comme un produit croisé des courants et des flux. Si nous reprenons l'écriture :

$$T_{em} = p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \quad (2.18)$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit ( $\phi_{qs}i_{ds}$ ), alors le couple ressemblerait à celui d'une MCC. Pour ce faire, il suffit d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et donc d'avoir  $\phi_{qs} = 0$  et  $\phi_s = \phi_{ds}$ , figure 2.3. [4]

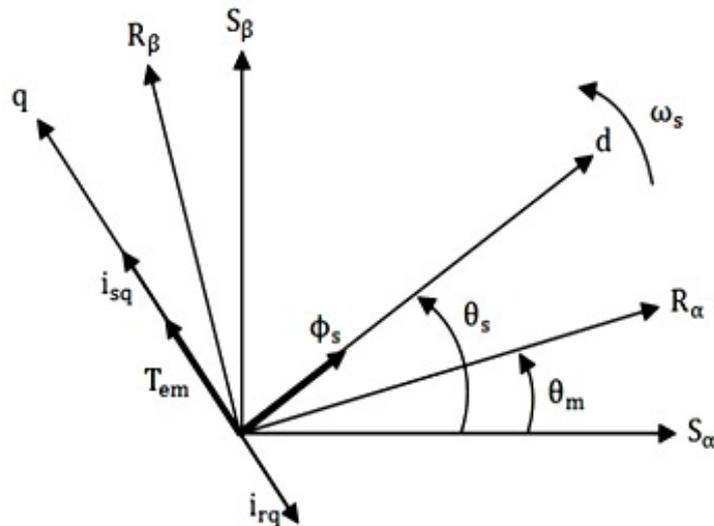


FIGURE 2.3 – Principe du contrôle vectoriel

Le couple s'écrit alors :  $T_{em} = p\phi_{ds} \cdot i_{qs}$ . Il convient de régler le flux en agissant sur la

composante  $i_{ds}$  du courant statorique et on régule le couple en agissant sur la composante  $i_{qs}$ . On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une MCC. Une stratégie consiste à laisser la composante  $i_{ds}$  constante. C'est-à-dire de fixer sa référence de manière à imposer un flux nominal dans la machine. Le régulateur du courant  $i_{ds}$  s'occupe de maintenir le courant  $i_{ds}$  constant et égal à la référence  $i_{ds}^*$  ( $i_{ds}^* = i_{dsref}$ ). Le flux étant constant dans la machine on peut imposer des variations de couple en agissant sur le courant  $i_{qs}$ . Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter sa vitesse, on impose une référence courant  $i_{qs}^*$  positive. Le régulateur du courant  $i_{qs}$  va imposer ce courant de référence à la machine, d'où un couple positif. On peut également automatiser le pilotage de cette référence de courant  $i_{qs}^*$  en la connectant à la sortie d'un régulateur de vitesse. C'est ce dernier qui pilotera le couple de référence (et donc  $i_{qs}^*$ ) puisqu'il agira au mieux de manière à asservir la vitesse à une vitesse de consigne  $\Omega^*$ . [4]

Avec la configuration choisit pour l'alimentation de la MADA, il est possible et recommandé de partager la puissance électrique fournie entre les deux armatures de la machine. Le couple et le flux de la machine sont contrôlés par l'intermédiaire de quatre boucles de courant [29] [38]. En se basant sur le modèle dynamique de la machine dans le repère tournant à la vitesse du champ tournant statorique, les expressions des tensions du stator et du rotor s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = (R_s + \sigma L_s.S)i_{ds} - R_r \frac{M}{L_r} i_{dr} - \omega_s \phi_{qs} + \omega_r \frac{M}{L_r} \phi_{qr} + \frac{M}{L_r} V_{rd} \\ V_{sq} = (R_s + \sigma L_s.S)i_{qs} - R_r \frac{M}{L_r} i_{qr} + \omega_s \phi_{ds} - \omega_r \frac{M}{L_r} \phi_{dr} + \frac{M}{L_r} V_{rq} \\ V_{rd} = (R_r + \sigma L_r.S)i_{dr} - R_r \frac{M}{L_s} i_{ds} - \omega_r \phi_{qr} + \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{qs} + \frac{M}{L_s} V_{sd} \\ V_{rq} = (R_r + \sigma L_r.S)i_{qr} - R_r \frac{M}{L_s} i_{qs} + \omega_r \phi_{dr} - \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{ds} + \frac{M}{L_s} V_{sq} \end{cases} \quad (2.19)$$

Dans le but d'obtenir un bon découplage entre les grandeurs suivant l'axe d et q nous définissons de nouvelles tensions intermédiaires, tel que :

$$\begin{cases} V'_{sd} = V_{sd} - \frac{M}{L_r} V_{rd} \\ V'_{sq} = V_{sq} - \frac{M}{L_r} V_{rq} \\ V'_{rd} = V_{rd} - \frac{M}{L_s} V_{sd} \\ V'_{rq} = V_{rq} - \frac{M}{L_s} V_{sq} \end{cases} \quad (2.20)$$

Ces expressions particulières nous permettent d'obtenir des relations directes entre les tensions intermédiaires et les courants statoriques et rotoriques dans les deux axes [29] [42].

$$\begin{cases} V'_{sd} = (R_s + \sigma L_s.S)i_{ds} - R_r \frac{M}{L_r} i_{dr} - \omega_s \phi_{qs} + \omega_r \frac{M}{L_r} \phi_{qr} \\ V'_{sq} = (R_s + \sigma L_s.S)i_{qs} - R_r \frac{M}{L_r} i_{qr} + \omega_s \phi_{ds} - \omega_r \frac{M}{L_r} \phi_{dr} \\ V'_{rd} = (R_r + \sigma L_r.S)i_{dr} - R_r \frac{M}{L_s} i_{ds} - \omega_r \phi_{qr} + \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{qs} \\ V'_{rq} = (R_r + \sigma L_r.S)i_{qr} - R_r \frac{M}{L_s} i_{qs} + \omega_r \phi_{dr} - \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.21)$$

Des termes de couplage témoignent de l'interaction entre les axes et les cotés de la machine apparaissent. Afin qu'on puisse définir les fonctions de transfert de chaque grandeur, il est indispensable de procéder à la compensation de ces termes[2].

$$\begin{cases} p_1 = -R_r \frac{M}{L_r} i_{dr} - \omega_s \phi_{qs} + \omega_r \frac{M}{L_r} \phi_{qr} \\ p_2 = -R_r \frac{M}{L_r} i_{qr} + \omega_s \phi_{ds} - \omega_r \frac{M}{L_r} \phi_{dr} \\ p_3 = -R_r \frac{M}{L_s} i_{ds} - \omega_r \phi_{qr} + \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{qs} \\ p_4 = -R_r \frac{M}{L_s} i_{qs} + \omega_r \phi_{dr} - \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.22)$$

Des fonctions de transfert entre les courants et les tensions d'un même axe au stator ainsi qu'au rotor peuvent être définies. Ces fonctions sont communes du côté de la machine [2]

$$\begin{cases} F^s(s) = \frac{1}{(R_s + \sigma.L_s.s)} \\ F^r(s) = \frac{1}{(R_r + \sigma.L_r.s)} \end{cases} \quad (2.23)$$

La structure de la régulation des courants dans les deux axes d et q est représentés sur la figure 2.4. Dans cette figure, des régulateurs de type PI sont utilisés pour pouvoir imposer les quatre courants à leurs références.

Ce schéma montre l'indépendance qui existe entre les deux axes de commande et mis en évidence le couplage du côté de la machine, stator et rotor, sur un même axe par le biais des tensions intermédiaires croisées [42]. Comme nous avons opté pour une orientation du flux statorique suivant l'axe d du repère lié au champ tournant, les références des courants en quadrature peuvent être déterminées directement à partir de l'équation du couple électromagnétique et la relation de proportionnalité qui existe entre les deux courants d'axe q.

$$i_{sq}^* = \frac{1}{p\phi_s} . T_{em}^* \quad (2.24)$$

Concernant la magnétisation de la machine plusieurs choix peuvent être faits. Dans le présent travail, nous souhaitons partager à égalité le courant de magnétisation, nécessaire pour imposer le module du flux statorique, entre les deux convertisseurs. Soit :

$$i_{sd}^* = i_{rd}^* = \frac{\phi_s^*}{L_s + M} \quad (2.25)$$

L'ensemble de la chaîne de régulation nous conduit au schéma de commande global développé sur la figure 2.4. Les grandeurs mesurables sont respectivement les courants du stator et du rotor et la vitesse mécanique de la machine [2].

La répartition des puissances actives entre le stator et le rotor devient une exigence dans la stratégie de contrôle à établir. Comme déjà affirmé, la répartition des puissances en régime permanent, en considérant l'influence des termes résistifs comme négligeable, conduit à une répartition des pulsations [2]. Dans ce travail, nous sommes fixés un objectif de répartir à égalité les puissances actives entre le stator et le rotor. Soit :

$$P_s = P_r \Rightarrow \omega_s = -\omega_r \quad (2.26)$$

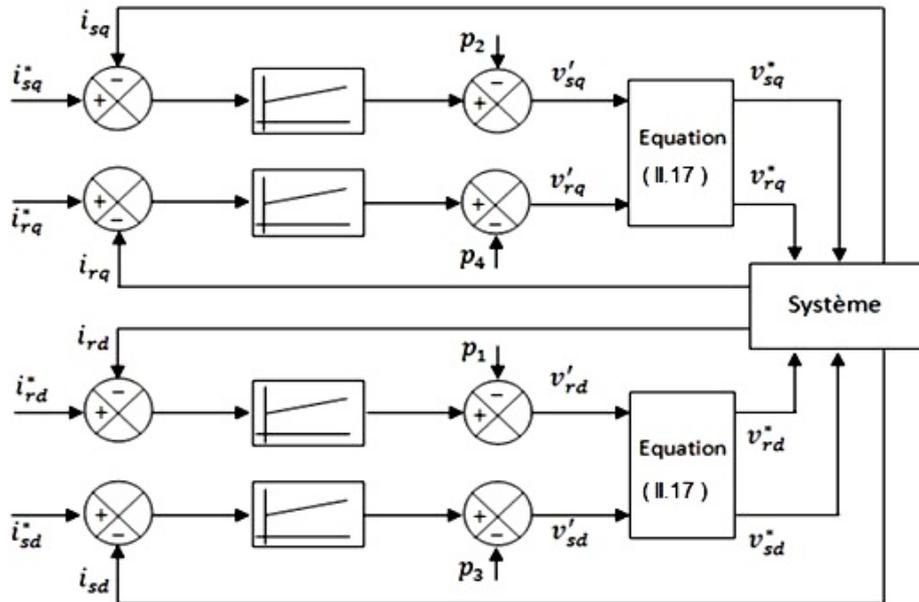


FIGURE 2.4 – Boucles de régulation des courants du stator et du rotor

Rappelons que la loi d'autopilotage doit être satisfaite, il est alors possible de formuler une relation entre chaque pulsation et la vitesse de la machine. Vu que les pulsations des deux armatures sont égales et de signe opposés, la machine fonctionne en régime double alimentation à une vitesse double de celle du champ tournant statorique.

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \Rightarrow \omega_m = 2\omega_s \quad (2.27)$$

Le fait que les angles de rotation du repère tournant sont accessibles et comme ils sont en liaison avec les pulsations que nous cherchons à imposer, il nous semble judicieux de les utiliser. Comme est visible sur la figure 2.5, la répartition des pulsations est assurée via les angles de transformation. Les références des pulsations donnent directement les angles à appliquer en fonction de l'angle de rotation de la machine [2].

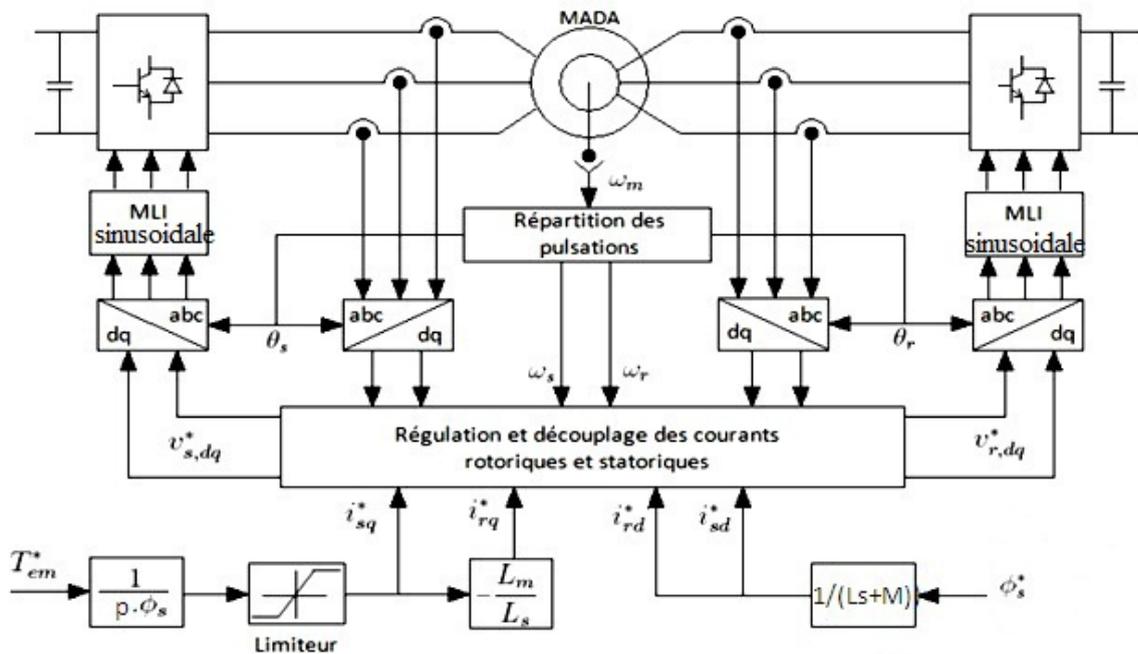


FIGURE 2.5 – Schéma de commande d'une MADA totalement interfacée

## 2.6 Modélisation de l'onduleur de tension

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure. 2.6, on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée de deux générateurs de f.e.m égale à  $U_0/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ . [7]

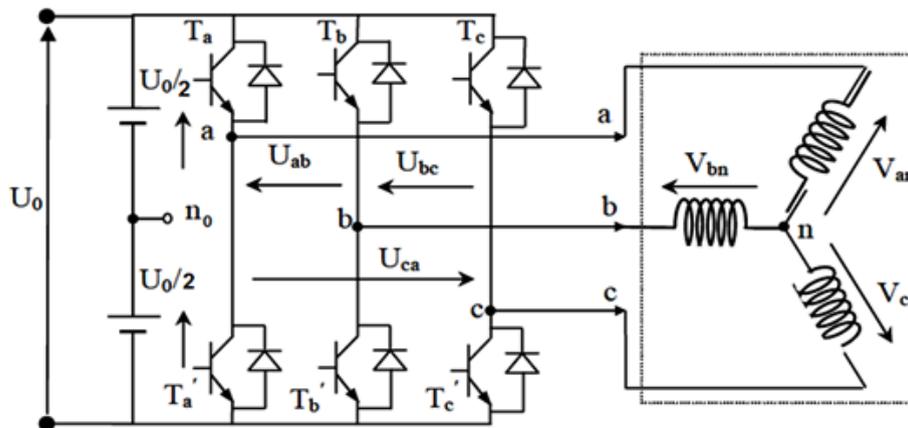


FIGURE 2.6 – Onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T'_i$  les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux) :

- si  $S_i = 1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T'_i$  est ouvert ;

- si  $S_i = 0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T'_i$  est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur. Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle [7], donc :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = \left(\frac{1}{3}\right)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (2.29)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad (2.30)$$

Donc, on peut déduire que :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \end{array} \right. \quad (2.31)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow$  Si (i=a, b, c) on a :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (S_a - 0, 5)U_0 \\ V_{bn_0} = (S_b - 0, 5)U_0 \\ V_{cn_0} = (S_c - 0, 5)U_0 \end{cases} \quad (2.32)$$

En remplaçant (2.30) dans (2.32), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an_0} + \frac{2}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} + \frac{2}{3}V_{cn_0} \end{cases} \quad (2.33)$$

En remplaçant l'équation (2.32) dans (2.33), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

### 2.6.1 Modulation de largeur d'impulsions sinusoïdale MLI

La technique MLI sinusoïdale est une technique très utilisée en industrie et est largement passée en revues dans la littérature.

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal de référence (modulante) à une porteuse (figure 2.7). Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence [3].

On définit :

- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence du modulante.

$$m = \frac{f_p}{f_o} \quad (2.35)$$

- L'indice d'amplitude  $r$  égal au rapport de l'amplitude de référence sur l'amplitude de la porteuse.

$$r = \frac{V_0}{V_p} \quad (2.36)$$

La valeur maximale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur vaut exactement.[39]

$$V_{max} = r \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.37)$$

Le choix des valeurs de  $m$  et  $r$  procède d'un compromis entre la neutralisation des harmoniques et le rendement de l'onduleur [39].

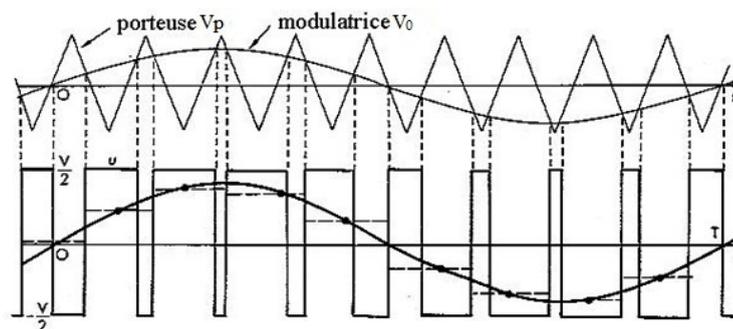


FIGURE 2.7 – Principe de la MLI sinusoïdale

## 2.7 Modélisation du couple résistant

Afin de modéliser le comportement dynamique du véhicule, toutes les forces qui lui sont appliquées devraient être connues.

Il convient de noter qu'ici l'effet des forces est considéré dans la direction longitudinale parce que le mouvement du véhicule dans la direction latitudinale n'est pas considérable. [40]. Par l'utilisation de la loi de Newton toutes les forces sont divisées en deux forces, forces dans la direction du mouvement,  $F_t$  qui est appliqué aux roues du véhicule, et  $F_r$  les forces de résistance qui sont appliquées dans la direction opposée du mouvement du véhicule. La loi de Newton est écrite comme suite :

$$\frac{dV_v}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{M_v} \quad (2.38)$$

Là où  $V_v$  est la vitesse linéaire du véhicule,  $M_v$  est tout le poids du véhicule,  $F_t$  est la traction de la force appliquée à partir des pneus à la terre et  $F_r$  est les forces équivalentes de résistance. Les forces de résistance appliquées au véhicule sont divisées en trois types. La première s'appelle résistance de roulement qui est due à l'hystérésis dans le matériel du pneu.

$$F_R = P.C_r \quad (2.39)$$

Avec :

$$C_r = 0,01(1 + \frac{V_v}{100}) \quad (2.40)$$

La force de roulement apparaît sur tout objet roulant. Dans le cas du véhicule, elle est due à la déformation de la roue ou du pneu et à l'état de surface de la route [33]. C'est une force qui s'oppose toujours au déplacement. Dans un pneu en repos, la force normale à la route équilibre le poids du véhicule au niveau du contact roue/sol. Quand le véhicule roule, les deux forces ne sont plus alignées à cause de la déformation du pneu. La figure 2.8 montre le décalage créé par la force de roulement qui produit un couple résistant à la roue.

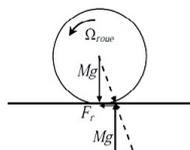


FIGURE 2.8 – Force de roulement sur la roue

Les facteurs qui affectent la résistance au roulement sont : le type de pneu, la pression des pneus, la température des pneus, la vitesse du véhicule, le revêtement routier, la matière du pneu et le niveau de couple transmis. Parmi ces facteurs, le type de pneu et la pression des pneus sont souvent les plus significatifs. Comme le  $C_r$  est proportionnel à la superficie de contact pneu/sol, un pneu plus petit minimise sa valeur, mais en même temps diminue l'adhérence de la roue.

Le coefficient  $C_r$  pour les pneus radiaux montés habituellement sur nos voitures, est d'environ 0,013. Ce coefficient augmente lorsque la pression diminue. Pour la traction électrique Michelin a développé des pneus dits "verts" d'une valeur de seulement 0,007, soit environ la moitié d'un pneu classique.[33]

L'autre résistance est la résistance aérodynamique qui est causée en raison de deux choses, la forme et l'effet de peau.

$$F_{ard} = 0,5\rho S_f C_x (V_v + V_w)^2 \quad (2.41)$$

La force de résistance aérodynamique  $F_{ard}$  est proportionnelle à la densité volumique de l'air  $\rho$ , à la section frontale du véhicule  $S_f$  ( $m^2$ ), au coefficient de pénétration dans l'air  $C_x$  (drag coefficient -  $C_d$  dans la littérature anglo-saxonne), à la vitesse du véhicule  $V_v$  (m/s) et à la vitesse du vent  $V_w$  (m/s) qui est positive dans le sens inverse de  $V_v$  et négative dans le sens de  $V_v$ .

Environ 60% de la puissance nécessaire pour rouler sur l'autoroute est utilisée pour surmonter la résistance aérodynamique qui augmente très rapidement avec la vitesse. Par conséquent, un véhicule avec une aérodynamique sensiblement meilleure sera plus économe en consommation de carburant [33].

La figure 2.9 représente la variation de la force aérodynamique en fonction de la variation du coefficient  $C_x$  entre 0,25 et 0,5 pour une plage de valeurs de la vitesse de véhicule de 0 à 120 km/h. Ces courbes montrent que pour une vitesse de 120 km/h un  $C_x$  de 0,4 augmente la force de résistance aérodynamique de 33% par rapport à un  $C_x$  de 0,3.

L'autre force de résistance  $F_g$  est appliquée quand le véhicule s'élève dans une pente comme elle est représentée sur la figure 2.10.

Une force dont la direction est opposée au mouvement du véhicule [40]. C'est une force liée au profil de la route et qui est nécessaire à un véhicule de masse  $M_v$  pour vaincre une pente.

Pour caractériser le profil de la route sur un parcours donné, il faut cartographier la pente en fonction de la distance parcourue ou, représente l'angle de la pente. [33].

$$F_g = M_v g \sin(\alpha) \quad (2.42)$$

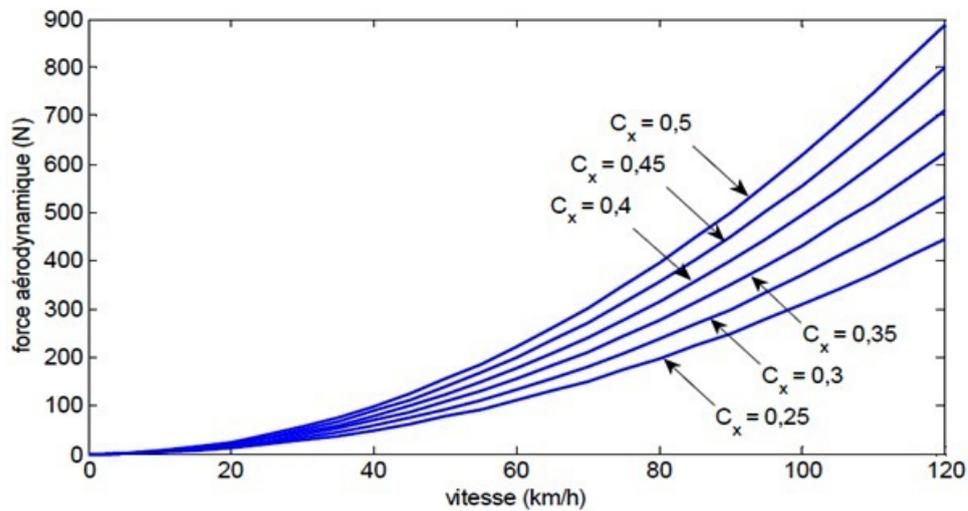


FIGURE 2.9 – Force aérodynamique en fonction de la vitesse pour différentes valeurs du  $C_x$

La force due à l'accélération assure le comportement dynamique souhaité par le conducteur. Cette force est obtenue par le produit entre la masse  $M_v$  de la voiture, l'accélération  $a$  imposée par le conducteur et un coefficient  $\delta$ .

$$\delta M_v a = F_t - (F_r + F_{ard} + F_g) \quad (2.43)$$

$$T_r = (F_r + F_{ard} + F_g)r + \delta M_v \frac{dV_v}{dt} \quad (2.44)$$

$\delta$  est un coefficient sans dimension, légèrement supérieur à 1, qui augmente la masse du véhicule proprement dite afin de prendre en compte l'inertie des masses en rotation telles que les roues, les engrenages, les axes et les rotors des moteurs électriques.

La variation de ce coefficient est de 1,01 à 1,4 et de 1,08 à 1,1. Il est de 1,1 à 1,3 pour une locomotive et de 1,04 pour une rame TGV ou Eurostar. [33]

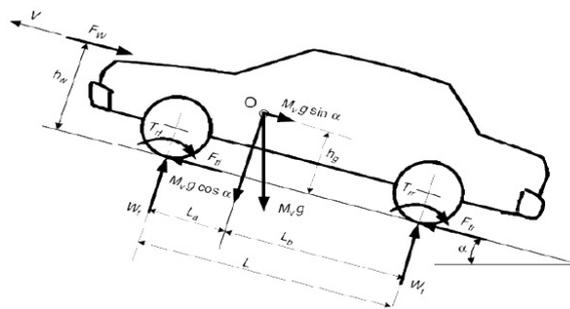


FIGURE 2.10 – Forces longitudinales du véhicule

Lors d'une phase d'accélération le coefficient  $a$  est positif et négatif lors d'une décélération. Comme les forces d'inertie (accélération et gravitation) sont réversibles, l'énergie liée à la force

due à la pente  $F_g$  et la force d'accélération  $F_a = \delta M_v a$  peut être récupérée si la motorisation et les sources sont réversibles.

Les paramètres considérés pour le calcul de  $T_r$  sont présentés dans le tableau 2.1

TABLE 2.1 – Paramètres de simulation

Symbole	Description	Unité	Valeurs
$M_v$	Masse du véhicule	(kg)	1150
$C_r$	Coefficient de résistance au roulement	(/)	0,015
$C_x$	Coefficient de pénétration dans l'air	(/)	0,32
$S_f$	Section frontale du véhicule	( $m^2$ )	2,5
$V_v$	Vitesse du véhicule	(m/s)	cycle
$V_w$	Vitesse du vent	(m/s)	7,5
$g$	Gravitation	( $m/s^2$ )	9,81
$\alpha$	L'angle de la pente	(degré)	10
$\rho$	Densité volumique de l'air	( $kg/m^3$ )	1,28
$r$	Rayon des pneumatiques	(m)	0,33

Ou :

$F_r$  : Force de résistance au roulement ;

$F_{ard}$  : Force de résistance aérodynamique ;

$F_g$  : Force de gravité ;

$T_r$  : Couple résistant ;

P : poids du véhicule.

On note que les frottements des pièces mécaniques à l'intérieur du véhicule sont négligés.

## 2.8 Modèle électrique de la batterie

### 2.8.1 Modèle idéal

Ce modèle est dite idéal, car il est le plus simple à étudier et ne comporte qu'une résistance interne nommée  $R_i$  comme représenté sur la figure 2.11. [6].

$$V_t = V_b - R_i I \quad (2.45)$$

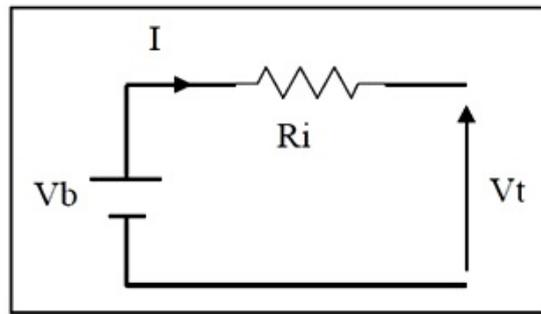


FIGURE 2.11 – Modèle idéal

### 2.8.2 Modèle de Thevenin

Ce modèle introduit une résistance appelée résistance du transfert  $R_t$ , qui représente l'effet de déplacement des ions entre les deux électrodes de la batterie, ainsi que la capacité dite à double couche, qui représente le phénomène de contact entre l'électrode et l'électrolyte comme représenté sur la figure 2.12 [6].

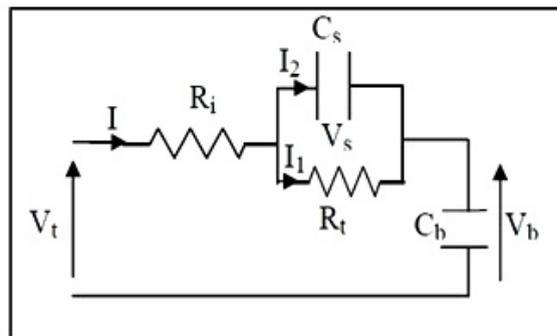


FIGURE 2.12 – Schéma électrique équivalente du modèle de Thevenin

$$V_t = V_b + V_s + R_i I \quad (2.46)$$

- $R_i$  la résistance interne ;
- $V_b$  la tension à vide (OCV) ;
- $C_s$  la capacité de la double couche ;
- $R_t$  la résistance de transfert ;
- $V_t$  tension de sortie de la batterie ;
- $C_b$  capacité de la batterie.

## **2.9 Conclusion**

Pour simuler le fonctionnement de la MADA, ou encore, pour étudier sa commande en régime transitoire ou en régime permanent, il faut choisir un modèle aussi simple que possible qui représente réellement la machine et traduit fidèlement son fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous avons représenté le modèle triphasé de la machine et de sa transformation en utilisant le modèle de Park, un modèle qui simplifie sa commande. La modélisation de la MADA a pour but de faciliter la mise en oeuvre de la commande vectorielle. Donc celle-ci est aussi étudiée et détaillée dans ce chapitre. Ensuite, on a modélisé le couple résistant du véhicule en mouvement en tenant compte des facteurs de résistances à ce mouvement. On a poursuivi par l'étude du système d'alimentation qui comporte la batterie et les convertisseurs d'électronique de puissance. Pour ces derniers, on a appliqué la technique de la MLI sinus triangulaire pour les commander.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus et les commenter.

# COMMANDE COUPLE-VITESSE DE LA MADA INTÉGRÉE DANS UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE

## 3.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré au contrôle d'un véhicule électrique à base d'une machine asynchrone doublement alimentée. Une seule structure d'alimentation de cette machine est considérée, cette dernière est une MADA entièrement interfacée avec le réseau électrique du véhicule, les deux armatures, stator et rotor, sont alimentées par deux convertisseurs de tension indépendants reliés à un même bus de tension continu. Le glissement est pris égale à -1 pour partager respectivement les puissances actives statorique et rotorique en deux valeurs égales. La figure 3.1 présente l'architecture de la commande de la structure considérée. Et nous présenterons les résultats obtenus par simulation du système globale munis de sa commande.

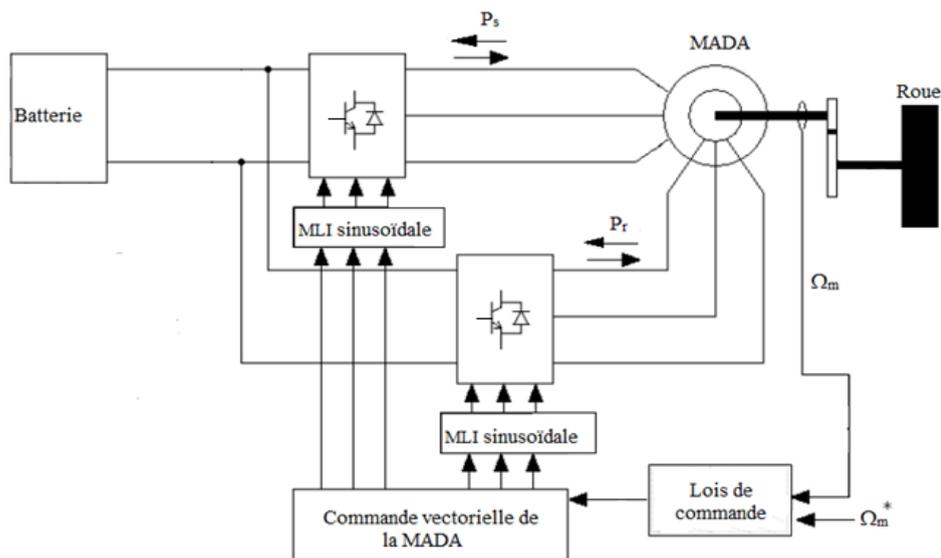


FIGURE 3.1 – Dispositif de commande global d'une MADA totalement interfacé

## 3.2 Simulation du système

Après avoir modélisé le schéma d'ensemble (MADA, convertisseur MLI, Batterie), on va simuler son modèle sous environnement MATLAB/Simulink.

### 3.2.1 Résultats de simulation

Les notions théoriques présentées précédemment ont été exploitées pour établir un programme qui simule le comportement dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté, munie d'un réglage de vitesse par un PI classique, et alimentée par deux onduleurs de tension, l'un au niveau du stator et l'autre au niveau du rotor (tous les paramètres de l'entraînement sont récapitulés dans l'annexe). Afin d'illustrer les performances statiques et dynamiques de la commande vectorielle, et les avantages du modèle choisi pour l'alimentation de la MADA, plusieurs régimes de fonctionnement ont été traités à savoir, le démarrage à vide, l'insertion du couple de charge, le changement de consigne et l'inversion du sens de rotation.

#### 3.2.1.1 Démarrage à vide

Dans ce cas, on a simulé le comportement d'un réglage de vitesse par un PI classique de la MADA à flux statorique orienté, lors d'un démarrage à vide pour une vitesse de référence qui varie entre 3000(tr/mn) et -3000(tr/mn). Les résultats de simulation de cet essai sont représentés par la figure 3.2. On constate que la vitesse de rotation suit parfaitement la vitesse de référence et que notre modèle peut atteindre une vitesse de presque deux fois sa vitesse nominale sans défluxage, et c'est l'un des avantages de la MADA.

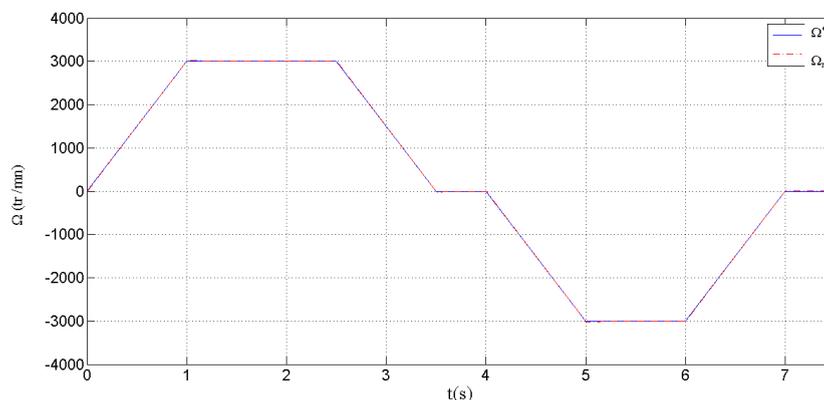


FIGURE 3.2 – Allures de la vitesse de rotation et la vitesse de référence

On constate sur la figure 3.3 que le couple électromagnétique marque un maximum de

125(N.m) et -125(N.m) en régime transitoire (respectivement, accélération, marche avant et marche arrière), puis diminue pour équilibrer le couple des frottements en régime établi, et prend aussi des valeurs de signe opposé aux premiers en régime de décélération.

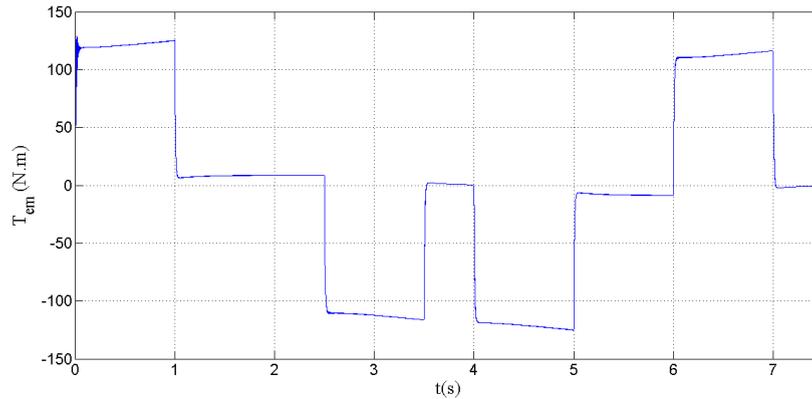


FIGURE 3.3 – Couple électromagnétique à vide (N.m)

Les courants de phase statorique, figure 3.4, et rotorique, figure 3.5 ont presque la même forme, on voit bien qu'ils prennent des valeurs maximales au démarrage. A l'accélération ils atteignent une valeur efficace de 38A puisque la machine a besoin d'un grand couple pour vaincre l'inertie et le couple résistant dû uniquement aux forces de frottement de la machine, ensuite ils se stabilisent autour de 10A à l'instant  $t=1$ s au régime Permanent, où le couple dynamique est nul,  $J \frac{d\Omega}{dt} = 0$ . Puis il augmente lors de la décélération à l'instant  $t=2.5$ s pour atteindre la valeur efficace de 35A, et cela est dû au mode freinage de la machine, jusqu'à ce qu'elle s'arrête à l'instant  $t=3.5$  et prend presque une valeur nulle, et c'est la même chose quand la machine change de sens de rotation. ça montre qu'ils suivent bien leurs références.

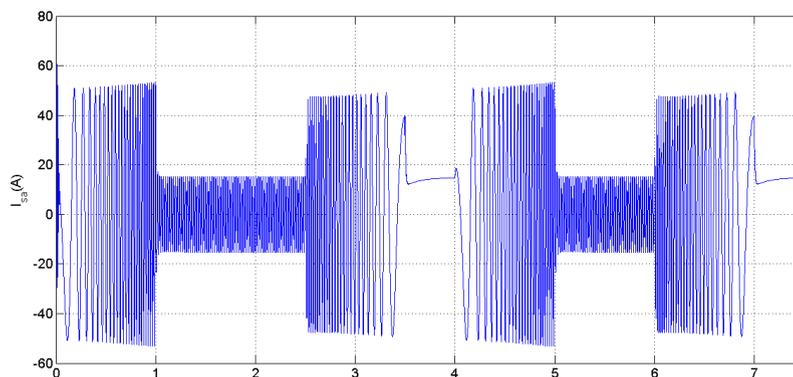


FIGURE 3.4 – Courant de phase statorique (A)

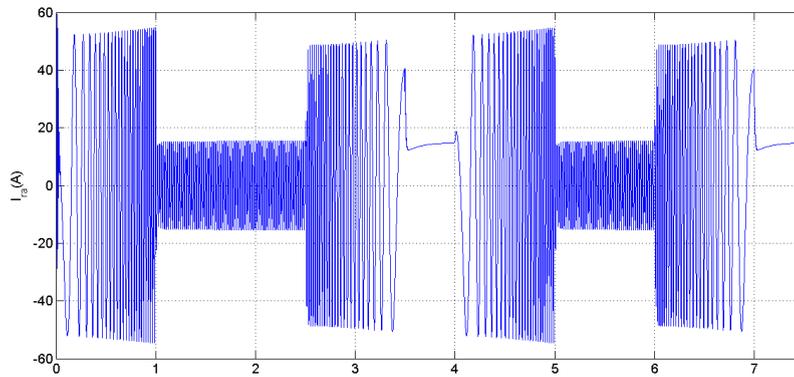


FIGURE 3.5 – Courant de phase rotorique (A)

Sur la figure 3.6, on voit bien que la composante directe du flux statorique suit presque sa valeur de référence qui est de 0.8(Wb).

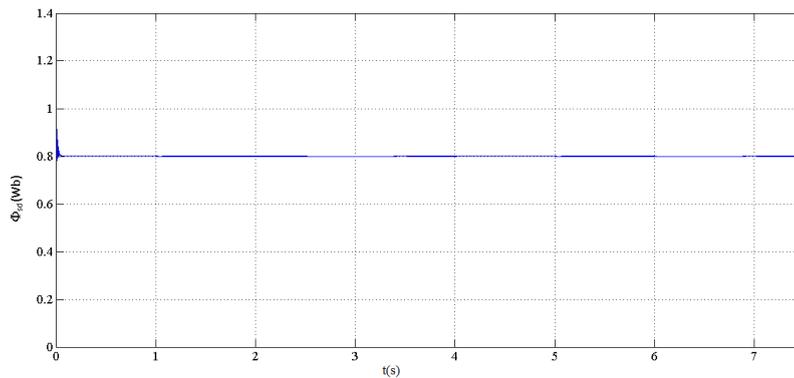


FIGURE 3.6 – Flux statorique direct (Wb)

Par contre sur la figure 3.7, la composante en quadrature prend quasiment la valeur nulle imposée par la condition d'orientation du flux statorique. Ces résultats montrent bien l'efficacité de la commande vectorielle et qui fait que notre machine possède la caractéristique de découplage entre le couple électromagnétique et le flux statorique comme la caractéristique d'une machine à courant continu à excitation séparée, que celle-ci possède naturellement.

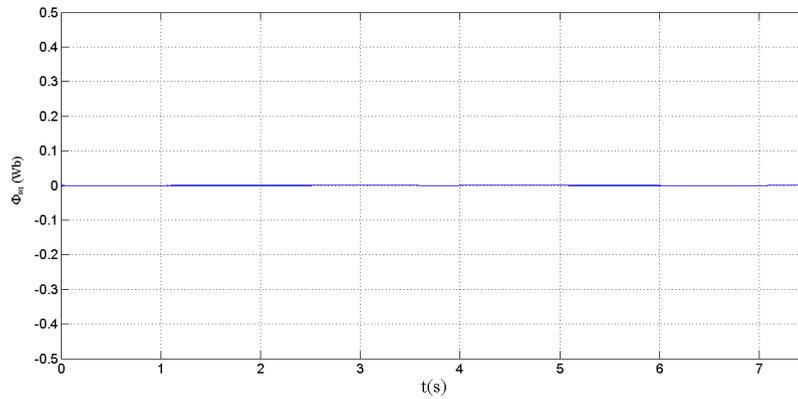


FIGURE 3.7 – Flux statorique en quadrature (Wb)

on remarque sur la figure 3.8, l'augmentation progressive au démarrage des puissances actives statorique et rotorique jusqu'à atteindre un maximum de consommation d'environ 10(kW) à l'instant  $t=1$ (s), c'est un fonctionnement en mode moteur et ça confirme l'hypothèse qui dit qu'au démarrage la machine a besoin d'une forte puissance pour vaincre sa propre inertie. Celui-ci diminue et se stabilisent autour de 700(W) au régime permanent, puisque le couple dynamique est nul. Ensuite les puissances changent de sens et prennent des valeurs négatives, c'est un fonctionnement en mode générateur. cela montre le caractère réversible de notre modèle. Et c'est la même chose quand la machine change de sens de rotation.

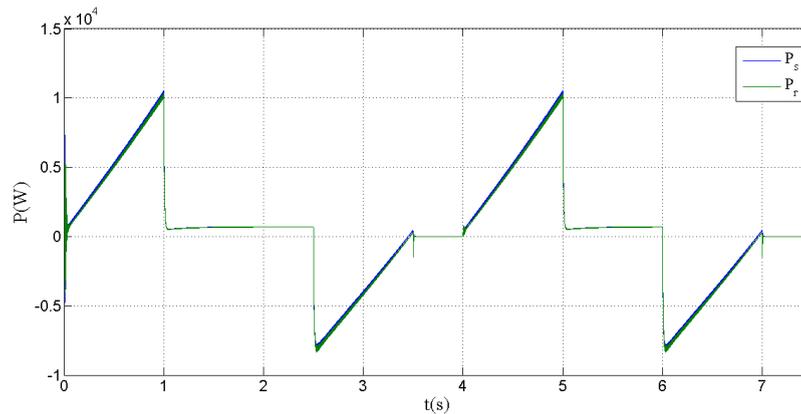


FIGURE 3.8 – Puissances actives statorique et rotorique (W)

En ce qui concerne la charge et la décharge de la batterie, la figure 3.9 montre qu'elle suit la forme de la puissance de la machine mais en sens inverse. En effet, quand la machine absorbe l'énergie, la tension de la batterie diminue et quand elle génère de l'énergie, la batterie : ce charge se qui apparait sur la forme de sa tension qui augmente. cela confirme que notre modèle de la batterie est proche de la réalité.

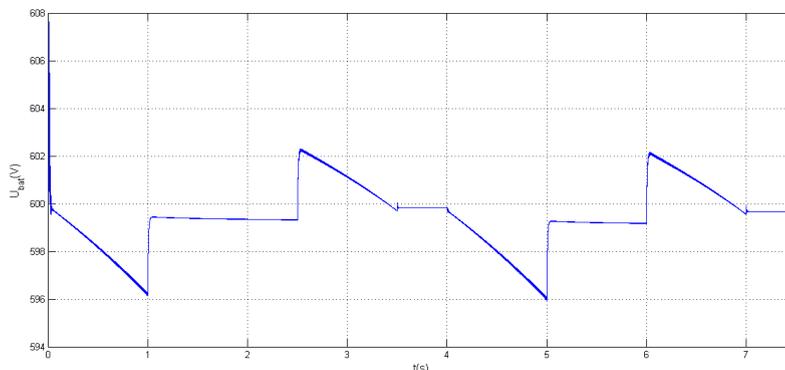


FIGURE 3.9 – Tension de la batterie

### 3.2.1.2 Démarrage avec un couple résistant

On impose à la MADA une vitesse de référence variable, ce qui suppose que le véhicule accélère ou décélère, et cela quelque soit son sens de déplacement. Aussi, un couple résistant qui est en fonction de la vitesse puisque le véhicule est soumis à la force de sa propre inertie et à la force aérodynamique qui est due aussi à l'effort du vent. Et enfin, l'angle  $\alpha$  qui représente la pente du parcours supposé suivi par le véhicule et qui lui impose une force dite du poids.

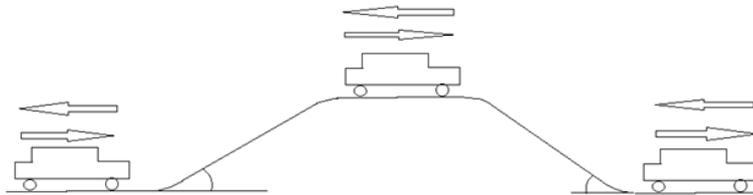


FIGURE 3.10 – Parcours pris par la voiture

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation avec la variation du couple résistant. On remarque d'après les résultats obtenus que la vitesse de rotation de la MADA suit parfaitement sa vitesse de référence et elle atteint même une valeur qui est égale au double de sa valeur nominale et celle là sans défluxage, comme l'atteste la figure 3.11.

C.à.d. que quand le conducteur du véhicule accélère, le moteur répond et cela malgré un grand couple résistant. Conclusion, nous pourrions diminuer le recours à l'utilisation des amplificateurs mécanique de vitesse et pourquoi pas la suppression pure et simple de la boîte à vitesse qui est censé diminuer la fiabilité et le rendement du moteur à cause notamment des frottements entre ses engrenages.

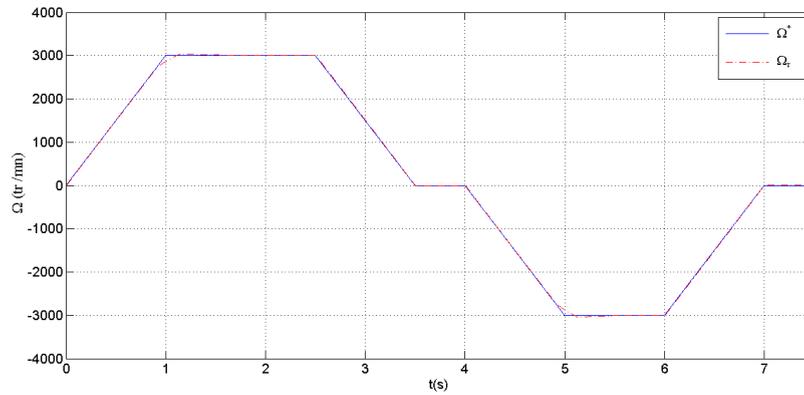


FIGURE 3.11 – Allures de la vitesse de rotation et de sa référence

Les pulsations statorique et rotorique ont des allures symétriques par rapport à l'axe de temps, comme le montre la figure 3.12, ce qui donne au glissement une valeur de  $g=-1$ .

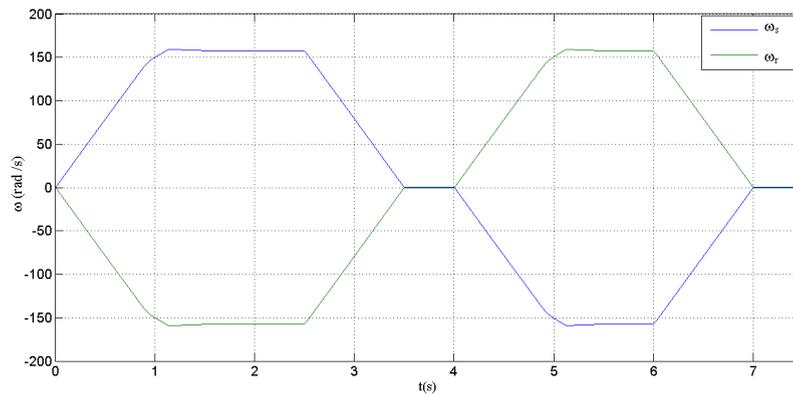


FIGURE 3.12 – Allure des pulsations des courants statoriques et rotoriques

La figure 3.13 représente les couples électromagnétique et résistant. Le couple électromagnétique présente une forte valeur au démarrage, il atteint un maximum de 300 (N.m) et -300 (N.m) en régime transitoire (accélération), et suit le couple résistant qui est dû essentiellement au poids et à l'inertie du véhicule, puis le couple diminue et suit le couple résistant pour se stabiliser à sa valeur nominale de 240 (N.m) à partir de 1,2(s) (régime permanent). Des perturbations apparaissent à chaque fois que la vitesse de rotation change de valeur, mais il maintient toujours sa valeur en régime permanent. Toutefois, on remarque qu'à chaque valeur de la vitesse, le couple électromagnétique présente une légère différence par rapport au couple résistant, et cela revient aux pertes mécaniques de la MADA.

On remarque aussi des parties où le couple électromagnétique devient négatif alors que le couple résistant est toujours positif, c'est justement là où la récupération d'énergie s'opère et

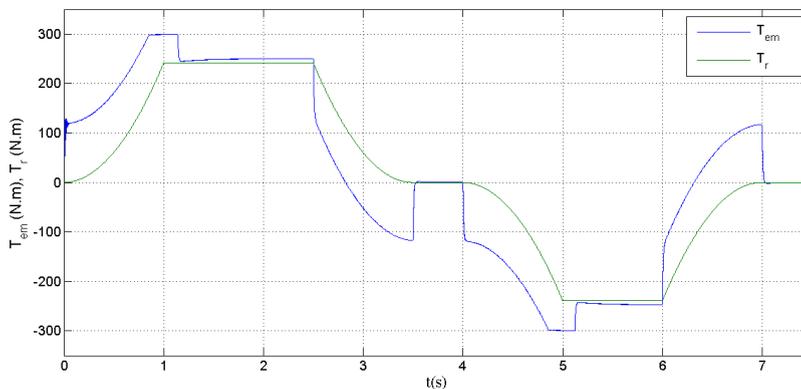


FIGURE 3.13 – Allures des couples électromagnétique et du couple résistant en fonction du temps

fait recharger la batterie. Ce qui va apparaître dans la figure de la puissance qui va devenir négatif, ça veut dire que la MADA est en mode générateur. Tout cela va apparaître aussi sur la figure de la tension de batterie qui augmente dans cet intervalle.

Sur la figure 3.14, on peut voir différents modes de fonctionnement de la MADA, représentés sur l'allure du comportement du courant et de la tension d'une phase statorique. On va visualiser trois périodes sur trois parties différentes et on va les agrandir.

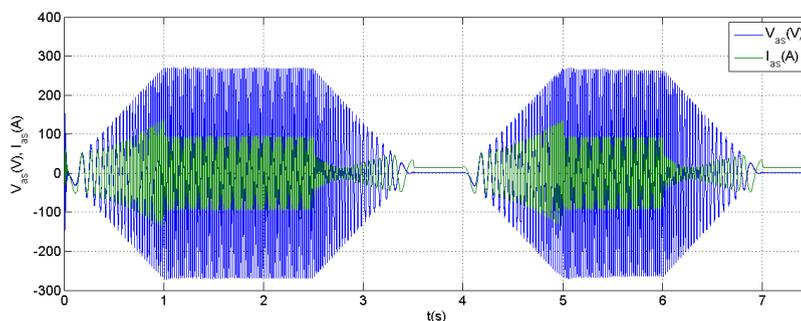


FIGURE 3.14 – Allures du courant et de la tension d'une phase statorique

Si on opère un agrandissement sur une période de la première partie de la figure 3.14, celle là va nous donner la figure 3.15. On peut remarquer qu'après le régime transitoire, l'amplitude du courant devient plus grande que celle de la tension, mais tous deux sont entrain d'augmenter. Celle là est dûe au couple de démarrage qui augmente, car le véhicule commence son parcours directement sur une pente. On remarque aussi que le courant est en retard par rapport à la tension puisque la machine est considérée comme un circuit inductif.

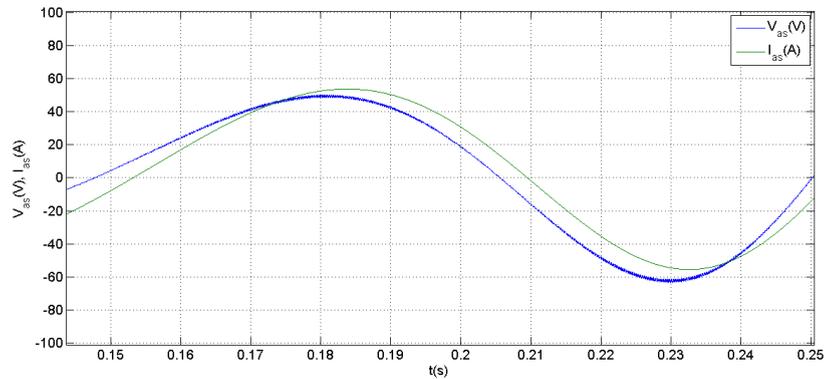


FIGURE 3.15 – Agrandissement de la première partie de la figure 3.14

Sur un agrandissement d'une période, opéré sur la deuxième partie de la figure 3.14, on peut voir que le courant et la tension prennent des valeurs constante et que l'amplitude du courant est inférieure à la tension, la MADA est alors en mode moteur car le véhicule est toujours soumis à un couple résistant positif et une vitesse positive. Comme l'atteste les figures 3.11 et 3.13. On remarque que le courant est toujours en retard par rapport à la tension.

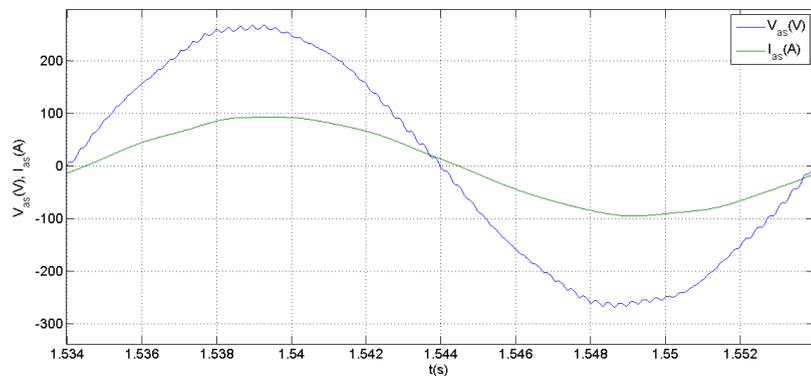


FIGURE 3.16 – Agrandissement de la deuxième partie de la figure 3.14

Sur la figure 3.17, on peut voir que l'amplitude du courant et de la tension sont entrain de diminuer, puisque le véhicule aborde une décente, mais au moment ou le couple prend des valeurs négatives et que la vitesse est toujours positive, on remarque que le courant augmente malgré que la tension continue à diminuer. A ce moment la, il y a récupération d'énergie électrique qui se fait au niveau de la batterie. La MADA est alors en mode générateur.

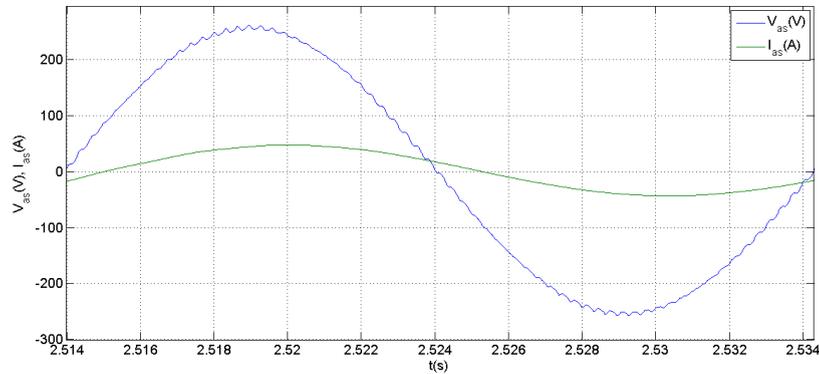


FIGURE 3.17 – Agrandissement de la troisième partie de la figure 3.14

La figure 3.18 représente les puissances actives statorique et rotorique. Au démarrage et lorsque la MADA est sollicitée par le conducteur pour augmenter la vitesse du véhicule, cette machine a besoin d'une grande puissance pour pouvoir vaincre le couple résistant. Et en optant pour un glissement  $g=-1$ , nous avons partagé cette puissance en deux parties égales,  $P_s$  et  $P_r$ , ce qui nous a permis de pousser cette machine à travailler à une valeur double de sa puissance nominale et toujours sans défluxage, et c'est là aussi l'un des avantages principaux de la MADA.

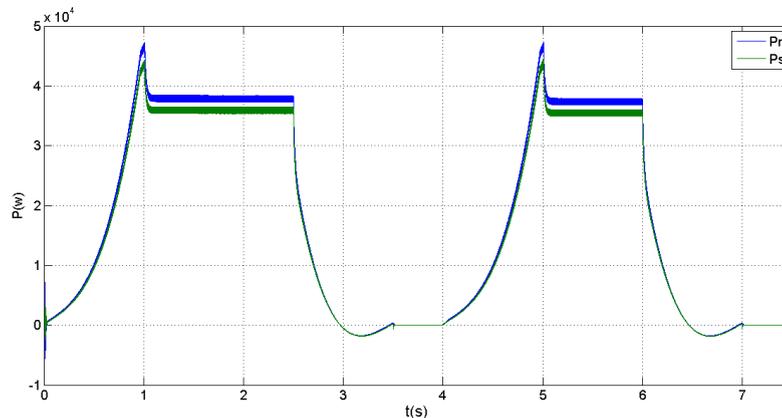


FIGURE 3.18 – Allure de la puissance active statorique et rotorique

On remarque aussi sur cette figure, la partie où la puissance devient négative, ce qui permet de récupérer de l'énergie électrique, permettant la recharge de la batterie.

La figure 3.19 vient conforter ce que nous avons expliqué précédemment. En effet, sur cette figure on peut voir la puissance débitée par la batterie, elle suit la forme des deux puissances  $P_s$  et  $P_r$  et est égale à leur somme.

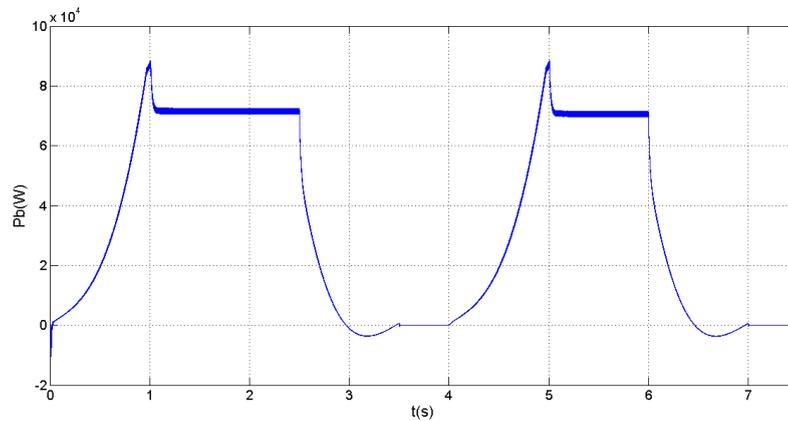


FIGURE 3.19 – Allure de la puissance de la batterie

Sur la figure 3.20, on voit que le flux statorique suit sa référence selon l'axe direct et prend une valeur de 0.8(Wb) ce qui va permettre la magnétisation de la machine.

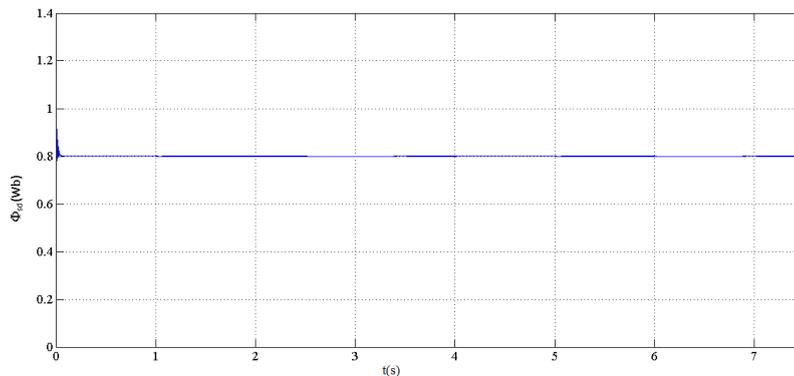


FIGURE 3.20 – Allure de flux statorique direct en fonction du temps

La figure 3.21, montre que le flux statorique en quadrature est nul. Sur ces deux dernières figures on voit bien que le flux statorique se dirige selon l'axe direct et que la composante en quadrature prend quasiment la valeur nulle imposée par la condition d'orientation du flux statorique. Sa montre l'efficacité de notre commande qui n'est autre que la commande vectorielle à orientation du flux. Celle-ci va nous permettre de séparer entre d'une part, la commande du couple, et d'autre part, la commande de la vitesse comme dans une MCC.

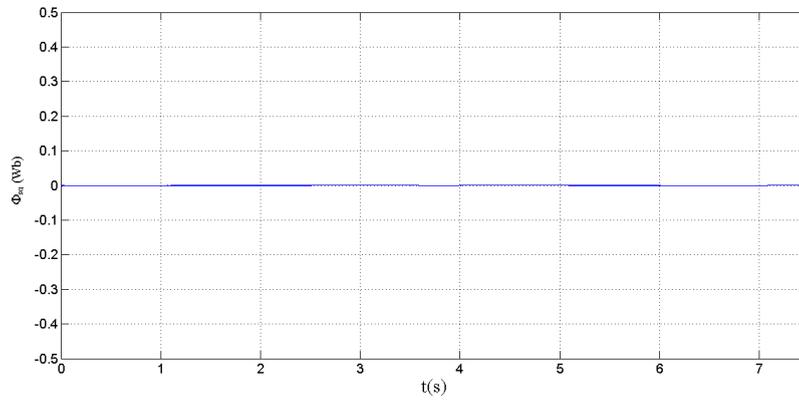


FIGURE 3.21 – Allure de flux statorique en quadrature en fonction du temps

La figure 3.22 représente la tension de la batterie. On voit que sa forme suit celle de la puissance mais dans le sens opposé. Lorsque le véhicule accélère, la MADA consomme de l'énergie électrique alors la tension de la batterie diminue et se décharge. Et dans le cas contraire ou la voiture décélère, la tension de la batterie augmente, et se charge.

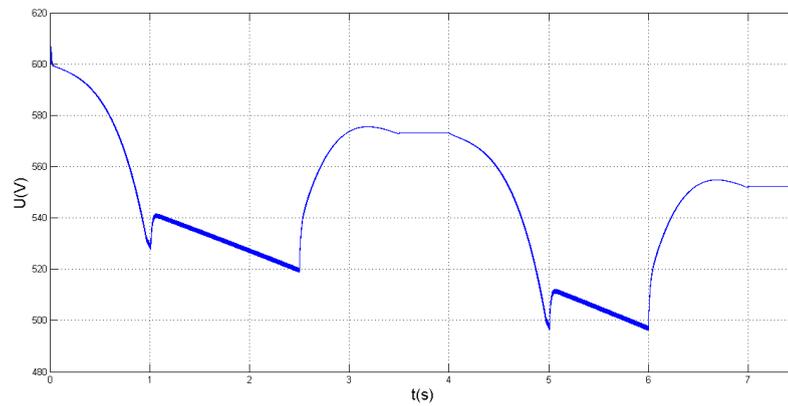


FIGURE 3.22 – Allure de la tension de la batterie en fonction du temps

Sur la figure 3.23, on peut voir l'énergie fournie par la batterie et qui est consommée par la machine.

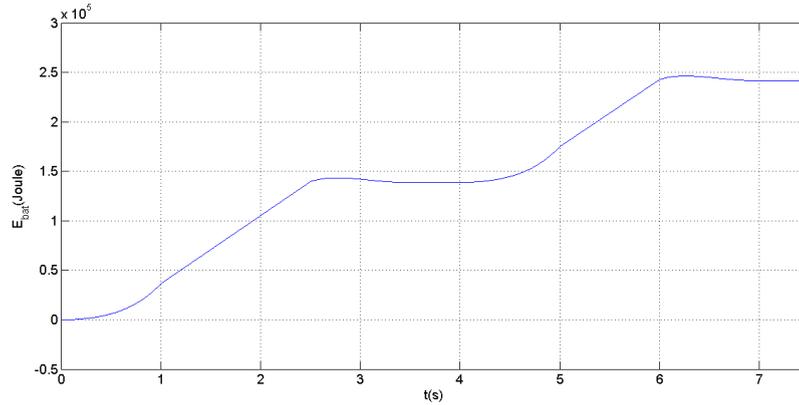


FIGURE 3.23 – Energie fournie par la batterie

Les figures 3.24 et 3.25 représentent respectivement les courants d'une phase statorique et d'une phase rotorique, ils prennent des valeurs efficaces maximales à l'accélération et atteignent 106(A), c'est dû au couple résistant qui augmente au fur et à mesure que le véhicule prend de la vitesse. Ensuite au régime permanent à partir de l'instant  $t=1(\text{s})$ , ils se stabilisent autour de 88(A). Là, le couple dynamique est nul puisque la vitesse est constante. Puis le courant diminue à la décélération du véhicule à partir de l'instant  $t=2.5(\text{s})$ . A l'arrêt du véhicule la valeur du courant est presque nulle. Le courant prend les mêmes valeurs quand le véhicule est en marche arrière et la machine tourne en sens inverse à la même valeur.

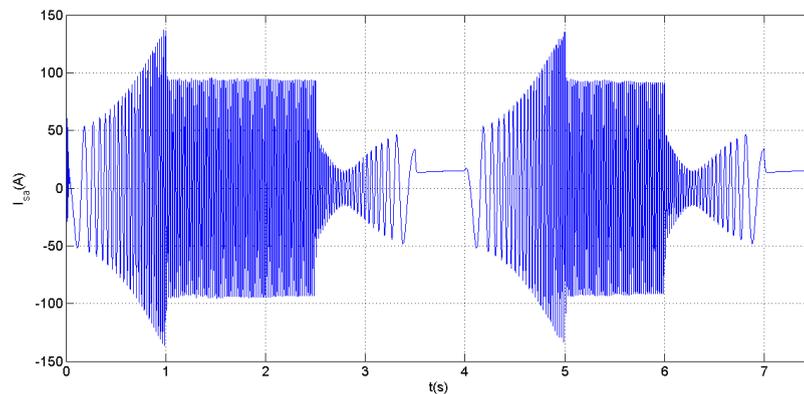


FIGURE 3.24 – Allure de courant d'une phase statorique

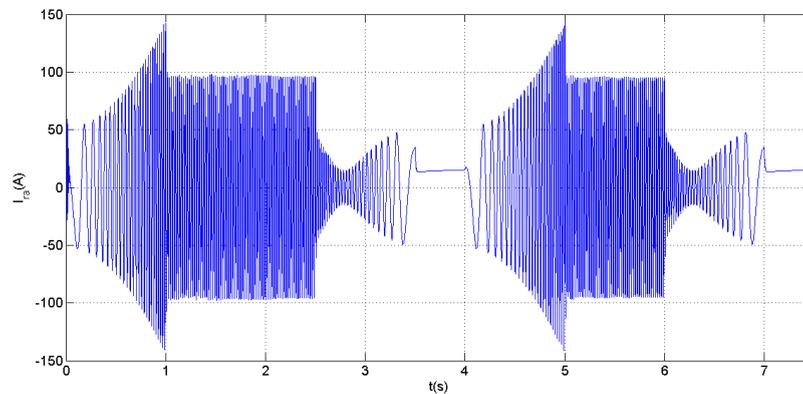


FIGURE 3.25 – Allure de courant d'une phase rotorique

### 3.3 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une comparaison entre deux résultats de simulation, le premier avec un couple résistant nul et le second avec un couple résistant qui varie en fonction de la vitesse et de l'angle  $\alpha$  qui représente la pente du parcours suivie par le véhicule. Nous avons constaté que la MADA offre plusieurs avantages. Par exemple on peut atteindre une vitesse de deux fois la vitesse nominale sans défluxage et répond bien aux exigences auxquelles est soumis le véhicule électrique. En effet, la structure unique de cette machine et le fait que nous puissions accéder aux phases du rotor, procurent plusieurs cas de figures qui vont faciliter son implantation dans un véhicule électrique : Tout d'abord, nous avons vu que du côté de la vitesse, la MADA nous offre la possibilité d'aller jusqu'à une valeur de deux fois sa vitesse nominale et sans défluxage et une puissance de deux fois la puissance nominale, ce qui a pour but de réduire le dimensionnement ou de supprimer carrément la boîte à vitesse, car elle est encombrante pour un véhicule et diminue grandement son rendement, en plus elle est chère à la fabrication. Ensuite, notre choix d'une structure où l'alimentation de la MADA se fait à travers deux convertisseurs d'électroniques de puissance et de travailler avec un glissement  $g=-1$ , nous avons partagé en deux la puissance active. Ce qui va permettre d'abord de réduire le dimensionnement et le coût des deux convertisseurs, ensuite cela va nous permettre de faire varier la vitesse de notre machine dans une large plage, jusqu'à deux fois sa vitesse nominale et sans défluxage. Le troisième avantage que nous offre cette machine est son grand couple de démarrage et un bon rapport entre la puissance et la masse, ce qui va grandement nous permettre de réduire la masse du véhicule et d'économiser de l'espace ainsi que de l'énergie pour la propulsion. Nous avons constaté aussi que les performances obtenues avec la commande vectorielle sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de la trajectoire et la convergence rapide des grandeurs mesurées vers leurs références désirée. D'après ce chapitre nous pouvons

dire que la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique permet de traiter la MADA de façon semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée ; ce qui permet d'obtenir une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable comme pour notre cas. Et enfin, nous avons pu montrer les performances du modèle de batterie que nous avons choisi.

# Conclusion Générale

Ce travail a pour objectif de concevoir un système capable de répondre aux fortes sollicitations et à la grande variation de vitesse auxquelles est soumis le moteur d'un véhicule électrique. Nous avons pu réaliser un modèle basé sur une machine asynchrone à double alimentation capable de simuler et de répondre au mieux à ces conditions. Pour cela nous avons réparti notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre présente un bref aperçu historique sur les véhicules électriques et véhicules hybrides, ainsi que les différentes machines électriques qui peuvent être utilisées dans la traction de ces derniers dont la machine asynchrone à rotor bobiné, ce qui nous a aidé à choisir une structure pour laquelle la MADA pourra s'intégrer dans un véhicule électrique.

Le deuxième chapitre a fait l'objet d'une modélisation mathématique des différentes parties de la chaîne de traction électrique à savoir, la batterie, les convertisseurs statiques et la MADA, ainsi que la commande vectorielle de cette dernière et le calcul du couple résistant de cette chaîne.

Dans le troisième et dernier chapitre, on a présenté les résultats de simulation du contrôle du système global étudié qui nous ont permis de mettre en évidence l'importance des avantages de la MADA et son comportement vis-à-vis du changement des conditions auxquelles elle est soumise.

En effet, cette machine nous a permis de la faire fonctionner dans une large gamme de vitesse, car elle peut être montée jusqu'à une vitesse deux fois sa vitesse nominale sans défluxage et jusqu'à trois fois avec défluxage. On a montré aussi qu'elle est bien adaptée pour les applications de moteur à vitesse variable, ce qui pourra réduire le dimensionnement, ou la suppression de la boîte à vitesse.

En perspective, nous envisageons de remplacer le régulateur PI classique par les régulateurs non linéaires à savoir le régulateur flou, mode glissement, etc. Une réalisation pratique de cette chaîne de traction.

# Annexes

## A.1. Paramètre de la machine à double alimentation

Puissance nominale :  $P_n = 37(kW)$

Vitesse nominale :  $N_n = 1425(tr/mn)$

Nombre de paire de pôles :  $p = 2$

Courant nominal statorique :  $I_s = 67(A)$

Courant nominal rotorique :  $I_r = 67(A)$

Résistance statorique :  $R_s = 0.08233(\Omega)$

Résistance rotorique :  $R_r = 0.0503(\Omega)$

Inductance cyclique statorique :  $L_s = 0.027834(H)$

Inductance cyclique rotorique :  $L_r = 0.027834(H)$

Inductance mutuelle :  $M = 0.02711(H)$

Moment d'inertie :  $J = 0.37(kg/m^2)$

Coefficient de frottement :  $f = 0.02791(m.s/r)$

**A.2. Dimensionnement des régulateurs de courant** Nous développons ici une autre conception du régulateur PI, dite méthode de compensation des pôles, celle-ci est choisie pour les grandeurs courants et flux.

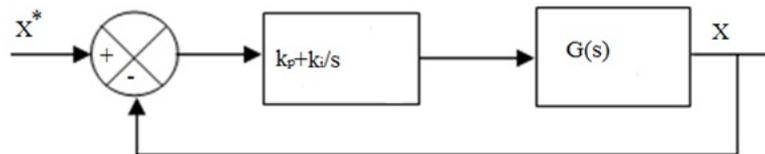


FIGURE 3.26 – Schéma bloc d'un processus régulé par un PI

Si on considère la fonction de transfert  $G(s)$  pour un processus associée à ce correcteur :

$$G(s) = \frac{G}{1+\tau.s}$$

tel que  $G$  est le gain statique et  $\tau$  est la constant du temps du processus. La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$F_{BO}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{G}{1+\tau.s}$$

Afin d'éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert en boucle ouverte, nous introduisons l'égalité suivante :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i}$$

Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$F_{BO}(s) = \frac{G.K_i}{s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$F_{BF}(s) = \frac{G.K_i}{G.K_i + s}$$

Le temps de réponse  $t_r$  du système boucle pour atteindre 95% de la consigne vaut :

$$t_r = 3 \cdot \frac{1}{G.K_i}$$

On peut alors exprimer les gains du correcteur en fonction des paramètres du processus et du temps de réponse choisi :

$$K_p = 3 \cdot \frac{\tau}{t_r \cdot G}$$

$$K_i = 3 \cdot \frac{1}{t_r \cdot G}$$

# Glossaire

MADA : Machine asynchrone à double alimentation

MLI : Modélisation de largeur d'impulsion

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique ( $\Omega$ )

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique ( $\Omega$ )

$l_s$  : Inductance de fuite statorique (H)

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique (H)

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases du stator (H)

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor (H)

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique (H)

$L_S$  : Inductance cyclique statorique (H)

$L_r$  : Inductance cyclique rotorique (H)

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_r}$  : Coefficient de dispersion entre le stator et le rotor

$i_{sd}, i_{sq}$  : Courants statoriques dans l'axe direct et en quadrature respectivement

$i_{rd}, i_{rq}$  : Courants rotoriques dans l'axe direct et en quadrature respectivement

$V_{sd}, V_{sq}$  : Tensions statoriques dans l'axe direct et en quadrature respectivement

$V_{rd}, V_{rq}$  : Tensions rotoriques dans l'axe direct et en quadrature respectivement

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants statoriques dans les axes a, b, c respectivement (A)

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  : Courants rotoriques dans les axes a, b, c respectivement (A)

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions statoriques dans les axes a, b, c respectivement (V)

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Tensions rotoriques dans les axes a, b, c respectivement (V)

$i^*$  : Courant de référence

$V^*$  : Tension de référence

$\phi_{sd}, \phi_{sq}$  : Flux statoriques dans l'axe direct et en quadrature respectivement (Wb)

$\phi_{rd}, \phi_{rq}$  : Flux rotoriques dans l'axe direct et en quadrature respectivement (Wb)

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$  : Flux statoriques dans les axes a, b, c respectivement (Wb)

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$  : Flux rotoriques dans les axes a, b, c respectivement (Wb)

$P_s, P_r$  : Puissances actives statorique et rotorique respectivement (W)

$Q_s, Q_r$  : Puissances réactives statorique et rotorique respectivement (VAR)

- $g$  : Glissement  
 $p$  : Nombre de paire de pôles  
 $\omega_s$  : Pulsation des courants statorique (rd/s)  
 $\omega_r$  : Pulsation des courants rotorique (rd/s)  
 $\omega_m$  : Pulsation électrique du rotor (rd/s)  
 $\Omega^*$  : Vitesse mécanique (tr/mn)  
 $\Omega$  : Vitesse de référence (tr/mn)  
 $T_{em}$  : Couple électromagnétique (N.m)  
 $T_{em}^*$  : Couple de référence (N.m)  
 $S$  : L'opérateur de Laplace  
 $P_1, P_2, P_3, P_4$  : Termes de couplage  
 $T_r$  : Couple résistant (N.m)  
 $\theta$  : Angle de la rotation (degrés)  
 $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  : Tensions simples (V)  
 $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  : Tensions composés (V)  
 $f_p, f_0$  : Fréquence de la porteuse et de la modulatrice respectivement (HZ)  
 $V_p, V_0$  : Amplitude de la porteuse et de la modulatrice respectivement  
 $m$  : Indice de modulation  
 $r$  : Taux de modulation  
 $V_{max}$  : Tension maximal de phase a la sortie de l'onduleur (V)  
 $VE$  : Véhicule électrique  
 $VH$  : Véhicule hybride  
 $V_v$  : Vitesse linéaire du véhicule (m/s)  
 $M_v$  : Masse du véhicule (kg)  
 $F_r$  : Force de résistance au roulement (N)  
 $C_r$  : Coefficient de résistance au roulement  
 $C_x$  : Coefficient de pénétration dans l'air  
 $S_f$  : Section frontale du véhicule ( $m^2$ )  
 $V_w$  : Vitesse de vent (m/s)  
 $F_{ard}$  : Force de résistance aérodynamique (N)  
 $\rho$  : Densité volumique de l'air ( $kg/m^3$ )  
 $P$  : Poids du vehicule ( $kg.m/s^2$ )

# Bibliographie

- [1] M. ABBAS et M. MECHENTEL. *Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne* . Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Algérie 2006.
- [2] F. ABDOUNE. *Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné* . Magister en Electrotechnique, Université de Bejaia 2011.
- [3] R. ACHOURI. *Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone, Simulation sur le logiciel SIMPLORERó, Validation expérimentale sur banc d'essai*. Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [4] L. BAGHLI. *Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone* . Notes de cours. IUFM de Lorraine - UHP 2005.
- [5] P. BARRET. *Régime transitoire des machines électriques tournantes* .Ecole supérieure d'Electricité, Eyrolles- Paris-1982.
- [6] N. BELAZI. *Estimation de l'état de charge (soc) et de l'état de santé (soh) d'une batterie lithium-ion utilisée pour les voitures électriques* . Ingénieur, Ecole de technologie supérieure université du Québec 2012.
- [7] F. BOUMARAF. *Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation* . Magister en électrotechnique, Université de Batna 2009.
- [8] R. BABOURI. *Contrôle, commande de la machine asynchrone à double alimentation dans les quatre quadrants couple-vitesse* . Université de Bejaia, 2010.
- [9] F. BADIN, B. JEANNERET, R. TRIGUI, F. HAREL. *Hybrid Vehicles, should we plug them to the grid or not ?*.The 18th International Electric Vehicle Symposium, 21-24 October 2001, Berlin, Germany.

- 
- [10] C. EOvsMus 06Mic 06Mes 07 BARBIER. *Modélisation et simulation du système véhicule électrique pour la conception et le contrôle de sa chaîne de traction*. Thèse, Institut national polytechnique de Toulouse, 1994, n<sup>o</sup> d'ordre : 938.
- [11] Ulf BOSSEL, Efficiency of Hydrogen PEFC. *Diesel-SOFC-Hybrid and Battery Electric Vehicles*. European Fuel Cell Forum, 15 July 2003, on-line : <http://www.efcf.com/reports/E04.pdf>.
- [12] Ulf BOSSEL, B. BALDUR and G. TAYLOR. *The Future of the Hydrogen Economy, Bright or Bleak?*. April 2003, on-line : [www.efcf.com/reports](http://www.efcf.com/reports) or [www.evworld.com/databases/storybuilder.cfm?storyid=471](http://www.evworld.com/databases/storybuilder.cfm?storyid=471).
- [13] Ulf BOSSEL. *Does a Hydrogen Economy Make Sense?*. 7 April 2005, on-line : 1.4. Références 40. [www.efcf.com/reports/E13.pdf](http://www.efcf.com/reports/E13.pdf).
- [14] Ulf BOSSEL. *On the Way to a Sustainable Energy Future*. Lucerne FUEL CELL FORUM 2006, July 3-7, 2006, on-line : [www.efcf.com/reports/E16.ppt](http://www.efcf.com/reports/E16.ppt).
- [15] A. BOYETTE. *Contrôle-Commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*. Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2004.
- [16] J. CHATELAIN. *Machines électriques tournantes*. Edition Dunod, tome1, 1983.
- [17] C. C. CHAN, K. T. CHAU. *Modern Electric Vehicle Technology*. Oxford University Press Inc., New York, 2001, ISBN : 0-19-850416-0
- [18] J.P.LOUIS et C.BERGMANN. *Commande numérique : régimes intermédiaires et transitoires*. Techniques de l'ingénieur D 3 643.
- [19] F.DELFOSSE. *Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique*. Ingénieur, Université de Liège 1998.
- [20] S.DASGUBTA, J. K. JACOBS, B. FLEET, R. RHOLA, G. MILICIC, A. AMAREI, H. HUTT, M. BODA, G. DASGUBTA. *A Long Range, Ultra-Safe, Low Cost Electric Vehicle, EVS21*. Monaco, 2-6 April 2005, disponible online à : <http://bioage.typepad.com/greencarcongress/docs/Electrovaya>
- [21] M. EHSANI, Y.GAO, S.E. GAY, A. EMADI. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design*, CRC Press LLC. 2005, USA
- [22] *Energie& Développement Durable Magazine, Hors série n<sup>o</sup>1*. avril 2004, [www.2e2d.info](http://www.2e2d.info)

- 
- [23] *American Honda Motor Co., Inc* : <http://automobiles.honda.com>
- [24] *Iqbal Husain, Electric and Hybrid Vehicles : design fundamentals, CRC Press LLC, 2003, ISBN : 0-8493-1466-6*
- [25] *Agence Internationale de l'Energie (IEA), HEVs& Governments, IEA's Hybrid and Electric Vehicle Agreement.* site web : [www.ieahev.org/government.html](http://www.ieahev.org/government.html).
- [26] *Agence Internationale de l'Energie (IEA), Véhicules Electriques : Technologie, Performances et perspectives, Editions TECHNIP.* Paris, France, 1994.
- [27] *Challenge Bibendum : le show des nouveaux concepts, Ingénieurs de l'Automobile, n°775 bis - supplément au n°775.*
- [28] M. KHALFALLAH, A. EL AFIA, A. SAAD, et J. GHOUILI. *Etude comparative des performances de la modulation sinusoïdale régulière et la modulation vectorielle d'un onduleur à MLI* . IEEE Transaction, Mai 2005.
- [29] S. KHOJET EL KHIL. *Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée. Optimisation des pertes dans les convertisseurs reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé* . Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2006.
- [30] I. KETAM et A. SAIDAENE. *Commande non linéaire d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA)*. Ingénieurs, université de Bejaia, 2010.
- [31] T. MAHE. *Motorisations hybrides : Que Faire ?, Industrie et Technologie.* n°868, mai 2005.
- [32] N. MEKKAOUI. *Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée* .Mémoire de Magister, Université de Batna, 2004.
- [33] V. MESTER. *Conception Optimale Systémique des Composants des Chaînes de Traction Electrique.* Thèse Doctorat, le 22 Mai 2007, Ecole Centrale de Lille.
- [34] P. MICHAUD. *La Honda Civic Hybride 2006.* Magazine MCI, article on-line : [http://www.magazinemci.com/articles/chroniques/2005/10/civic\\_hybride.htm](http://www.magazinemci.com/articles/chroniques/2005/10/civic_hybride.htm).

- [35] N. MUSTAPHA. *Taxi! Now urban commuters can have it all : style, service and sustainability, Time Style&Design, Green Living - Is Sustainability the New Luxury ?*. Summer 2006 Supplement to Time.
- [36] B. OVSHINSKY. *Plug-In Hybrids : State Of Play, History& Players*. The California Cars Initiative (CalCars), online : [www.calcars.org/history.html](http://www.calcars.org/history.html).
- [37] RENAUT. *Direction de la communication, Kangoo reinvents the electric car*. 2003, disponible on-line : [www.calcars.org/KangooRangeExtend.pdf](http://www.calcars.org/KangooRangeExtend.pdf).
- [38] G. SALLOUM. *Contribution 'a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation* . Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [39] G. SEGUIER, F. LABRIQUE et R. BAUSIERE. *Les convertisseurs de l'électronique de puissance* . Editions Lavoisier 2004.
- [40] Z. SIAVASH. *Modeling and simulation of vehicular power systems*. Master's thesis in the International master's 'Program 'Electric Power Engineering' Chalmers university OF technology Göteborg, Sweden, 2008.
- [41] T. M. RICHARD SMOKERS, ARDJAN J.J. DIJKHUIZEN and ROB G. WINKEL, Annex VII -Overview Report 2000 *Worldwide Developments and Activities in the Field of Hybrid Road-vehicle Technology, Agence Internationale de l'Energie (IEA), Hybrid& Electric Vehicle*. 2000, on-line : <http://www.ieahev.org/AnnexVII-2000.html>.
- [42] P. VIDAL. *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation* .Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2004.
- [43] Wikipedia. *General Motors EV1*. on-line :[http://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Motors\\_EV1](http://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors_EV1).
- [44] Wikipedia. *Global Hybrid Cooperation*. on-line :[http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Hybrid\\_Cooperation](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Hybrid_Cooperation).
- [45] Wikipedia. *Hybrid vehicle*. on-line : [http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle).
- [46] Wikipedia. *Plug-in hybrid electric vehicle*. on-line :[http://en.wikipedia.org/wiki/Plug-in\\_hybrid\\_electric\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Plug-in_hybrid_electric_vehicle).
- [47] N. KHALIL. *Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées aux machines de type synchrone*. Thèse Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2010.

# Résumé

Les véhicules électriques d'aujourd'hui utilisent des machines spécifiques, et parmi elles on trouve, les machines à courant continu, les machines synchrones et plus particulièrement les machines synchrones à aimants permanents, à réluctance variable et les machines asynchrones à cage. L'objectif de notre travail est d'intégrer la MADA comme moteur d'un véhicule électrique et de la faire fonctionner dans une large plage de variation de vitesse aussi bien pour le fonctionnement moteur que pour le fonctionnement générateur. La structure d'alimentation qu'on a choisi pour répondre à ces exigences est la structure où l'alimentation du côté de la machine est assurée par deux convertisseurs d'électronique de puissance (au stator et au rotor), ces deux convertisseurs sont alimentés par une batterie.