



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

**ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE ET DE LOIS DE CONTRÔLE D'UNE
ARCHITECTURE DE VÉHICULE HYBRIDE**

DEBORAH SENNA CANONGIA

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Oumar Diene, D.Sc.

Rio de Janeiro

Agosto de 2013

ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE ET DE LOIS DE CONTRÔLE D'UNE ARCHITECTURE DE VÉHICULE HYBRIDE

DEBORAH SENNA CANONGIA

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Oumar Diene, D.Sc.

(Orientador)

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

(Examinador)

Walter Issamu Suemitsu, Dr.Ing

(Examinador)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Agosto de 2013

Canongia, Deborah Senna

Étude Énergétique et de Lois de Contrôle d'Une
Architecture de Véhicule Hybride / Rio de Janeiro: UFRJ / Escola
Politécnica/ Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Orientador: Oumar Diene

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica /
Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 65-66.

I. Diene, Oumar. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. III.
Escola Politécnica. IV. Departamento de Engenharia Elétrica. V.
Título

“La persistance est le plus court chemin vers le succès.”

Charles Chaplin

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord l'entreprise VALEO pour m'avoir permis de réaliser mon stage de fin d'étude au sein de son centre R&D de Créteil.

Je tiens à remercier mon tuteur à l'école, Mme. Maria David, qui a toujours été présent pendant mes deux années à l'école et m'a bien conseillé quand j'ai eu besoin sur le choix de mon stage.

Je remercie M. Tarek Koubaa, mon tuteur de stage, pour m'avoir appris comment me porter dans un environnement d'entreprise, à être pragmatique, organisé et synthétique. Sans ses conseils, ce rapport ne serais pas le même. J'aimerais aussi le remercier pour m'avoir fait confiance et pour m'avoir laissé une grande autonomie dans mon projet.

Je remercie aussi M. Jean François Duguey, qui est devenu mon co-tuteur au cours de ses 6 mois, pour m'avoir partagé ses connaissances et son expertise, et pour sa présence constante et sa patience pour répondre à toutes mes questions.

Je remercie également à toutes les personnes de Valeo Créteil qui m'ont très bien accueilli, et à ceux qui ont répondu à mes diverses interrogations ou qui ont participé à la réussite de mon stage de fin d'étude.

Je tiens à adresser des remerciements particuliers à ma famille, qui même de loin m'a toujours donné de support pendant ce projet, et à tous mes amis qui m'ont suivi pendant tout mon parcours.

Plus largement, je remercie à tous ceux qui étaient présents, de près ou de loin, durant ces deux dernières années.

Resumé du Projet de Graduation présenté à POLI/UFRJ comme partie des exigences nécessaires pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Électrique.

ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE ET DE LOIS DE CONTRÔLE D'UNE ARCHITECTURE DE VÉHICULE HYBRIDE

DEBORAH SENNA CANONGIA

Agosto/2013

Ce projet a pour objectif l'étude et analyse d'une architecture de véhicule hybride proposée par l'entreprise au sein duquel ce travail a été réalisé, Valeo Engine & Electrical Systems. La course à la performance et à l'innovation du contexte actuel de l'industrie automobile a été la cause principale de cette étude.

Cette étude a été réalisée avec le but de connaître et mieux comprendre les véhicules hybrides, à partir d'une vision plutôt électrique de l'automobile. En même temps, la recherche permet d'analyser les différentes architectures possibles pour la chaîne de traction ainsi comme d'étudier et comprendre les différentes formes de transférer le flux de puissance du véhicule.

Une étude de contrôle a aussi été mise en place pour améliorer et découvrir des nouvelles formes de transfert de puissance électrique dans un véhicule hybride, tout en envisageant la diminution des émissions des gazes, l'efficacité énergétique et la bonne performance de l'automobile.

Mots-clés: Véhicule Hybride, Automobile, Transfert de Puissance, Machines électriques, Lois de Contrôle, Efficacité énergétique, Performance

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

ENERGY STUDY AND CONTROL LAWS OF A HYBRID VEHICLE ARCHITECTURE

DEBORAH SENNA CANONGIA

August/2013

This project aims the study and analysis of a hybrid architecture proposed by the company which this work was done, Valeo Engine & Electrical Systems. The race for performance and innovation in the current context of the automotive industry has been the main cause of this study.

This study was conducted with the purpose of knowledge and understanding of hybrid vehicles, from a rather electric vision of the automobile. At the same time, research is used to analyze the different possible architectures for the drivetrain as well as to study and understand the various forms of transferring the power flow of the vehicle.

A control study was also implemented to improve and discover new forms of transferring the electric power in a hybrid vehicle, while considering the reduction of gas emissions, energy efficiency and good performance of the car.

Keywords: Hybrid Vehicle, Automobile, Power Transfer, Electrical Machines, Control Laws, Energy Efficiency, Performance.

Sommaire

REMERCIEMENTS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
1 INTRODUCTION	1
2 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	2
2.1 LE GROUPE VALEO	2
2.1.1. <i>Organisation du groupe</i>	3
2.1.2. <i>Le site de Créteil</i>	4
3 ETAT DE L'ART	6
3.1 VEHICULES HYBRIDES ELECTRIQUES	6
3.2 CLASSIFICATION DES VEHICULES HYBRIDES	6
3.2.1. <i>Hybridation du véhicule</i>	6
3.2.2. <i>Architecture employée</i>	8
3.3 TRANSMISSION INTEGRALE	11
3.4 ETUDE DE LA CONCURRENCE	12
3.4.1. <i>PSA 3008</i>	12
3.4.2. <i>Lexus RX400h</i>	13
3.5 ARCHITECTURE MILD HYBRID 4X4 VALEO	15
3.6 CONCLUSION DE L'ETAT DE L'ART.....	19
4 ETUDE ENERGETIQUE.....	20
4.1 DEFINITION DU CAHIER DE CHARGES	20
4.1.1. <i>Cycle de roulage</i>	20
4.1.2. <i>Paramètres du véhicule</i>	21
4.1.3. <i>Moteur thermique</i>	22
4.1.4. <i>Stocker d'énergie</i>	24
4.1.4.1 Batterie Lithium-ion.....	25
4.1.4.2 Super Condensateur	28
4.1.5. <i>Machines Electriques</i>	28
4.2 SIMULATIONS ET RESULTATS	30
4.2.1. <i>Analyse des modes de roulage</i>	30
4.2.1.1 Range Extender	30
4.2.1.2 Générateur.....	33
4.2.1.3 ZEV.....	33
4.2.1.4 Freinage Récupératif	34
4.2.2. <i>Simulations</i>	36
4.3 CONCLUSION DE L'ETUDE ENERGETIQUE	42
5 ETUDE DES LOIS DE CONTRÔLE.....	43
5.1 MACHINES ELECTRIQUES EMPRUNTEES	43
5.2 REGULATION ET CONTROLE DES MACHINES	45
5.2.1. <i>Modélisation de la machine synchrone à double excitation</i>	45
5.2.2. <i>Le modèle linéaire de la MSDE</i>	46

5.2.3.	<i>Machine MH3</i>	48
5.2.4.	<i>Machine MH1</i>	53
5.3	ADAPTATION DU RESEAU CONTINU.....	58
5.4	CONCLUSION DE L'ETUDE DES LOIS DE CONTROLE	60
6	CONCLUSION.....	61
7	BILAN PERSONNEL	62
8	GLOSSAIRE.....	63
9	BIBLIOGRAPHIE.....	65

Liste des Figures

Figure 2.1 - Valeo dans me monde.....	3
Figure 2.2 - Les 4 pôles de Valeo.....	4
Figure 3.1 - Architecture série.....	9
Figure 3.2 - Architecture Parallèle	10
Figure 3.3 - Architecture mixte	10
Figure 3.4 - Transmission intégrale.....	11
Figure 3.5 - PSA 3008	12
Figure 3.6 - Lexus RX400h.....	14
Figure 3.7 - Architecture du véhicule hybride.....	16
Figure 3.8 - Rendement d'un moteur thermique.....	18
Figure 4.1 - Cycle NEDC	21
Figure 4.2 - Cartographie du moteur thermique.....	23
Figure 4.3 - Représentation du transfert de puissance dans le moteur thermique.....	24
Figure 4.4 - Caractéristique d'une cellule lithium-ion.....	26
Figure 4.5 - Puissance demandé aux roues du véhicule.....	29
Figure 4.6 - Puissance délivrée par le moteur thermique.....	31
Figure 4.7 - Phases de roulage 1.....	32
Figure 4.8 - Phases de roulage 2.....	32
Figure 4.9 - Freinage récupératif - Phase urbaine	35
Figure 4.10 - Freinage récupératif - Phase extra-urbaine.....	35
Figure 4.11 - Schéma de simulation.....	37
Figure 4.12 - Stratégie 1 : Mode et état de la batterie	39
Figure 4.13 - Stratégie 1 : Puissances électriques MH1 et MH3.....	40
Figure 4.14 -Stratégie 2 : Mode et état de la batterie	41
Figure 4.15 - Stratégie 2 : Puissances électriques MH1 et MH3.....	41
Figure 5.1 - Diagramme couple-vitesse des machines	44
Figure 5.2 - Modèle linéaire MSDE.....	46
Figure 5.3 - Schéma onduleur + MSDE linéaire	47
Figure 5.4 - Schéma de compensation du courant d'excitation	49

Figure 5.5 - Diagramme de Bode - Axe d	50
Figure 5.6 - Diagramme de Bode - Axe q	50
Figure 5.7 - Diagramme de Bode - Circuit d'excitation	51
Figure 5.8 - Régulation du couple	52
Figure 5.9 - Régulation du courant Id.....	52
Figure 5.10 - Régulation du courant d'excitation	53
Figure 5.11 - Tensions alterné Van	53
Figure 5.12 - Schéma en sortie du convertisseur.....	55
Figure 5.13 - Régulation de la tension de bus DC.....	56
Figure 5.14 - Courant triphasé.....	56
Figure 5.15 - Zoom du courant triphasé	57
Figure 5.16 - Régulation du courant d'excitation	57
Figure 5.17 - Schéma réseau continu	59

Liste des Tableaux

Tableau 3.1-Classification des véhicules hybrides.....	7
Tableau 3.2 - Représentation des composants pour les diverses architectures hybrides.....	9
Tableau 3.3 - Modes de roulage du mode <i>Automatique</i> de la PSA3008.....	13
Tableau 3.4 - Modes de roulage du Lexus RX400h.....	15
Tableau 3.5 - Modes de roulage possibles.....	17
Tableau 4.1 - Paramètres de la chaîne de traction	22
Tableau 4.2 - Différence entre les stockeurs d'énergie.....	25
Tableau 4.3 - Limites de courant de la batterie lithium-ion	27
Tableau 4.4 - Résistance interne - Batterie.....	27
Tableau 4.5 - Gain en carburant du mode <i>Range Extender</i>	33
Tableau 4.6 - Gain en freinage	36
Tableau 4.7 - Comparaison des stratégies	38
Tableau 4.8 - Gain d'émission du mode REX	42

1 Introduction

Dans le cadre de ma formation d'ingénieur ENSEEIHT, j'ai effectué mon stage de fin d'étude au sein de la société VALEO Engine & Electrical Systems au centre R&D de Créteil. Valeo compte parmi les premiers équipementiers mondiaux.

La course à la performance et à l'innovation est une variable essentielle dans le domaine automobile. En même temps que le développement des produits existants et consolidé dans le marché, les sociétés de ce domaine cherchent toujours des nouvelles stratégies pour améliorer la performance en même temps que diminuer la consommation de carburant dans le véhicule.

Le but de ce stage est d'étudier et d'analyser une nouvelle architecture de véhicule hybride proposé par Valeo. Cette architecture s'intègre dans la stratégie Valeo de réaliser des véhicules Mild Hybride avec batterie à basse tension (48V). La batterie étant un élément cher, on envisage un fonctionnement plus indépendant du stockeur d'énergie.

Je commence ce rapport avec une recherche bibliographique pour bien comprendre les architectures hybrides existantes déjà sur le marché des automobiles hybrides. Cela me permet d'acquérir une connaissance plus profonde du fonctionnement d'un véhicule hybride au-delà des systèmes électriques et comprendre l'innovation proposé dans le cadre de ce stage.

Ensuite, l'analyse de la validité de l'architecture est réalisée au travers d'une étude énergétique. Cela nous permet de connaître la consommation de carburant, ainsi comme les émissions de CO₂ durant le cycle de roulage normalisé NEDC de l'automobile selon un certain profil, utilisé pour tous les constructeurs, à titre de comparaison.

L'étude énergétique réalisée, une étude de stabilité en automatique sera mis en place pour gérer tous les transferts de puissance du véhicule hybride. La modélisation du fonctionnement des machines électriques a été réalisée pour assurer la bonne démarche du véhicule pendant les différents moments de roulage du véhicule (accélérations, freinage, arrêt, etc.).

Enfin, une conclusion générale sur l'ensemble de ce travail viendra clore ce rapport accompagné de mon ressenti personnel au cours de ces 6 mois passés au sein de Valeo.

2 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

2.1 Le groupe Valeo

En 1923, Eugène Buisson ouvre une usine de garnitures d'embrayages et de freins à Saint-Ouen. Cet atelier fait parti de la société Ferodo. Pendant l'expansion d'après guerre, l'entreprise rachète d'autres sociétés et crée de nouvelles filiales en Europe. Ferodo se diversifie dans les différents équipements automobiles, et c'est en 1980 que l'entreprise devient Valeo, « je vais bien » en latin, le nom de la filiale italienne du groupe.

A partir de 1987, Valeo débute sa véritable expansion internationale. Le groupe Valeo implante alors ses unités de recherche et de production sur tous les continents. Il est aujourd'hui devenu un groupe industriel français indépendant et international dédié à la conception, la fabrication, et la vente de composants de systèmes intégrés et de modules pour l'automobile et les poids lourds. Le groupe se classe parmi les premiers équipementiers mondiaux et fournit tous les grands constructeurs automobiles et poids lourds.

Le groupe emploie 55100 collaborateurs, répartis dans 118 centres de production, 21 centres de recherche, 40 centres de développement (R&D), et 10 plates-formes de distribution dans 27 pays (chiffres au 31 mars 2010). Ses dépenses en R&D s'élèvent en moyenne annuelle à un peu plus de 6% du chiffre d'affaires.

Avec plusieurs milliers d'ingénieurs dans ses bureaux d'études et ses laboratoires de recherche, Valeo dépose chaque année plusieurs centaines de brevets. Le total des produits de l'activité du Groupe s'élève à 7,5 milliards d'euros en 2009.

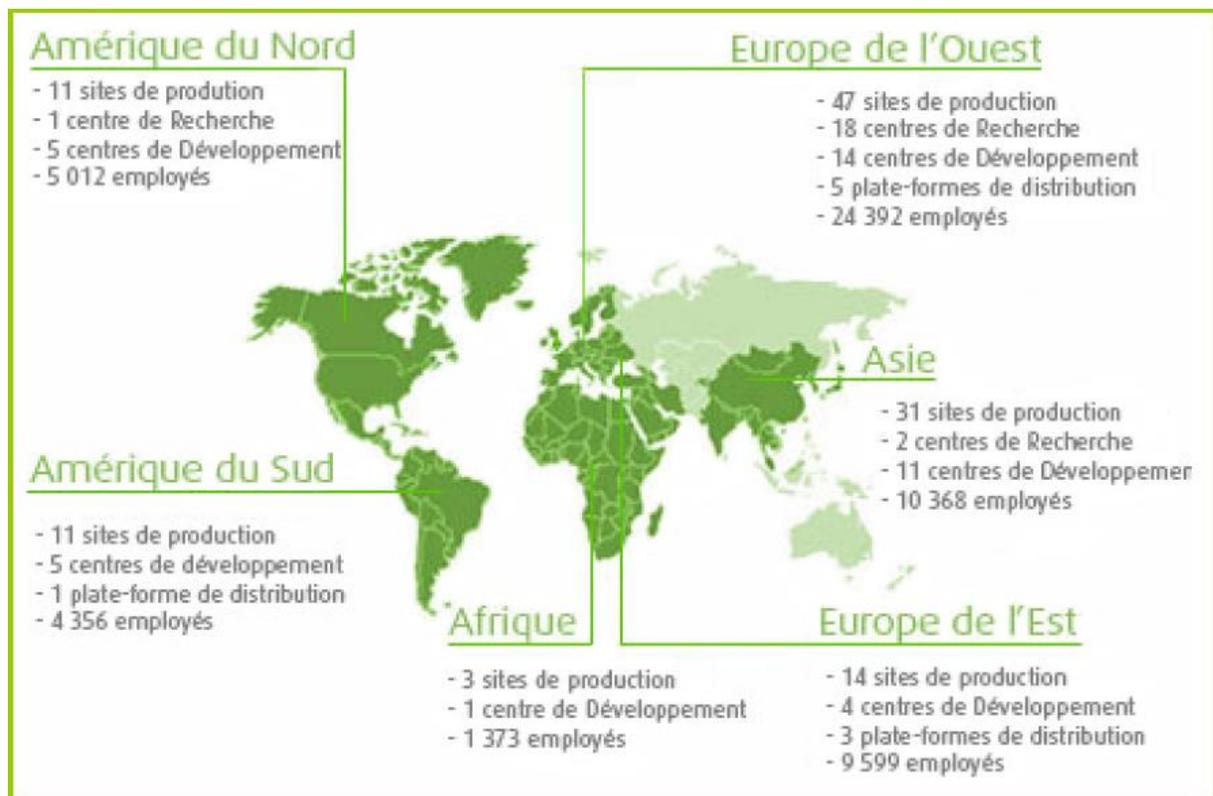


Figure 2.1 - Valeo dans me monde

2.1.1. Organisation du groupe

Valeo comporte 4 pôles regroupant 9 familles de produit. Les 4 pôles sont Systèmes de Confort et d'Aide à la Conduite, Systèmes de Propulsion, Systèmes Thermiques et Systèmes de Visibilité.



Figure 2.2 - Les 4 pôles de Valeo

Le pôle Systèmes de Propulsion comporte deux familles de produit : Transmissions et Systèmes Electriques Moteur. La mission de la famille de produits Transmissions est de développer et produire des systèmes qui permettent de transférer et de contrôler la puissance du moteur à la transmission, à la fois pour les voitures et les poids lourds. Les solutions proposées sont entre autres des systèmes de filtration des bruits, vibrations et à-coups. Cette famille de produits est présente sur les principaux marchés de première et de deuxième monte.

La famille de produits Systèmes Electriques et Moteur quant à elle prend en charge des fonctions du véhicule telles que la génération et la gestion de l'énergie électrique et le démarrage des moteurs. La recherche et le développement dans cette famille de produits permettent d'améliorer le confort des automobilistes et de réduire la consommation et les émissions polluantes. On y retrouve par exemple les alternateurs, les démarreurs, et les alerno-démarreurs. Le centre R&D de Créteil dans lequel j'ai effectué mon stage fait partie de cette dernière famille de produit, et concentre donc son activité sur les alternateurs et alerno-démarreurs.

2.1.2. Le site de Créteil

Le site de Créteil comprend à la fois la direction de la branche Systèmes Electriques, les services commerciaux de la branche, et le centre recherche et développement, qui concentre son activité sur les alternateurs et alernodémarreurs.

Les domaines d'action du centre de Créteil sont multiples :

- Conception des futurs alternateurs grâce à des logiciels de C.A.O.
- Conception des futurs régulateurs et redresseurs
- Essais mécaniques sur pot vibrant (endurance vibratoire, vérification de la tenue mécanique)
- Fiabilité prévisionnelle (essais de chocs thermiques par exemple...)
- Fiabilité de prototypes d'alternateurs sur une flotte d'environ 200 véhicules « gros rouleurs » (taxis, véhicules d'administration...) afin de vérifier leur comportement dans leur application finale
- Essais électriques et thermiques sur les alternateurs
- Mesures acoustiques en chambre semi anéchoïque

Le site de Créteil est dit « site de compétences » de la branche, car il assure le support technologique aux divisions internationales récentes, telle que l'Inde et la Chine.

3 ETAT DE L'ART

3.1 Véhicules hybrides électriques

Un véhicule est appelé hybride quand il possède au moins deux sources d'énergie de nature différentes dans sa chaîne de traction pour fournir de l'énergie. Les véhicules électriques hybrides (VEH), qui seront étudiés ultérieurement, sont limités à ceux qui ont un moteur à combustion interne (ICE), un stockage de l'énergie et au moins un moteur électrique [1].

L'intérêt de ce type de véhicule réside sur le besoin de diminuer la dépendance du pétrole et les émissions des gaz polluants, toujours pour protéger l'environnement. La meilleure solution pour cela existe déjà avec les véhicules électriques, qui ont zéro émissions, par contre, ils ne sont pas encore prêts à conquérir le marché des véhicules classiques à cause de la faible capacité des batteries. L'approvisionnement d'énergie ne suffit pas pour les longs trajets.

Donc, un hybride d'aujourd'hui combine la gamme étendue d'un véhicule conventionnel avec les avantages environnementaux d'un véhicule électrique. Il en résulte un véhicule avec l'économie de carburant améliorée et moins, mais pas zéro, d'émissions [1].

3.2 Classification des véhicules hybrides

Plusieurs possibilités sont envisageables pour classer les différents types de VEHs. On peut cependant les séparer en deux catégories :

- hybridation du véhicule (rapport entre la puissance du moteur thermique par rapport à la puissance du moteur électrique) ;
- architecture employée.

3.2.1. Hybridation du véhicule

L'hybridation du véhicule prend en compte les fonctionnalités qu'il peut réaliser en fonction de son taux d'hybridation. Cette classification se distingue par quatre niveaux : le *micro hybrid*, le *mild hybrid*, le *full hybrid* et le *plug-in hybrid*. Le Tableau 3.1 [2] explique ces différences ainsi comme la réduction de carburant attribué au véhicule.

Tableau 3.1-Classification des véhicules hybrides

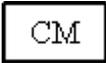
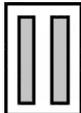
Type d'hybride	Fonctions	Gain en carburant (cycle urbain)	Exemple de véhicules
Micro hybrid (Stop/Start hybrid)	<ul style="list-style-type: none"> • Arrêt du Moteur thermique (Mth) : chaque fois que le véhicule est à l'arrêt, le Mth est stoppé afin de moins consommer ; • Redémarrage du Mth : la Machine Électrique (ME) (alterno-démarrreur) intégré redémarre le Mth quand le conducteur active la pédale d'accélérateur ; • Accélération : l'alterno-démarrreur peut aider le Mth au démarrage et pendant de courtes accélérations ; • Mode normal : le Mth fonctionne seul ; • Un couple supplémentaire de la ME peut être fourni pour pallier les acyclismes du Mth. 	3 à 6 %	<p>Citroën C3</p> <p>Toyota Crown</p> <p>GM Saturn</p>
Mild hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • La principale différence entre le Micro et le Mild hybrid est que l'alterno-démarrreur intégré est remplacé par une ME séparée ; • La ME propulse rarement le véhicule seul, elle assiste plutôt le Mth ; • Comparé au Micro hybrid, la ME, l'alternateur et les batteries sont plus puissants et donc jouent un rôle plus important dans le fonctionnement du véhicule. 	7 à 10 %	<p>Honda Insight</p> <p>Honda Civic</p> <p>Honda Accord</p>
Full hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Sa configuration est quasiment la même que le Mild hybrid sauf que les composants sont encore plus puissants ; • La ME peut propulser souvent le véhicule seul, par- 	15 à 25 %	<p>Toyota Prius</p> <p>Ford Escape</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • particulièrement pour une conduite en ville ; • Le Mth peut être plus petit car la ME est de plus grande puissance et peut donc fournir un plus grand couple dans une gamme de régime donnée. • Le système de commande est plus complexe afin d'optimiser la gestion de puissance. 		
Plug-in hybrid	<ul style="list-style-type: none"> • Son architecture est semblable au Full hybrid avec cependant une sortie de connexion au niveau de la batterie afin de échanger celle-ci par une source extérieure (réseau) ; • La ME, l'alternateur et les batteries sont considérablement de plus grandes puissances ; • Le système de commande doit empêcher de recharger la batterie tant que celle-ci n'a pas atteint un niveau minimal. Si celui-ci est atteint alors on passe en fonctionnement Full hybrid. 	40% à 60%	<p>Gruau Micro-bus</p> <p>Daimler-Chrysler Sprinter</p>

3.2.2. Architecture employée

La classification des architectures permet de mettre en évidence les couplages mis en jeu. On peut diviser les architectures en trois types distinctes : *série*, *parallèle* et *mixte*. On part du principe que les machines électriques représentées sont alternatives triphasés, étant le type le plus répandu sur les VEHS. Pour le stockeur d'énergie, on le représente par une batterie, source la plus souvent employée [2]. Le Tableau 3.2 [2] montre les représentations utilisées dans les figures de ce rapport.

Tableau 3.2 - Représentation des composants pour les diverses architectures hybrides

Composants Mécaniques	Synoptique	Composants Electriques	Synoptique
Flux d'énergie mécanique		Flux d'énergie électrique	
Roue du véhicule		Convertisseur de puissance	
Différentiel mécanique		Couplage électrique	
Couplage mécanique (engrenages)		Embrayage mécanique	

L'hybride série – L'hybride série (Figure 3.1) est le plus simple des VEHS. Ce type de véhicule est équipé d'une propulsion intégralement électrique qui peut être assurée par une ou plusieurs machines électriques. L'énergie provient généralement d'une batterie, d'un groupe électrogène (moteur thermique, génératrice électrique) ou les deux simultanément [2].

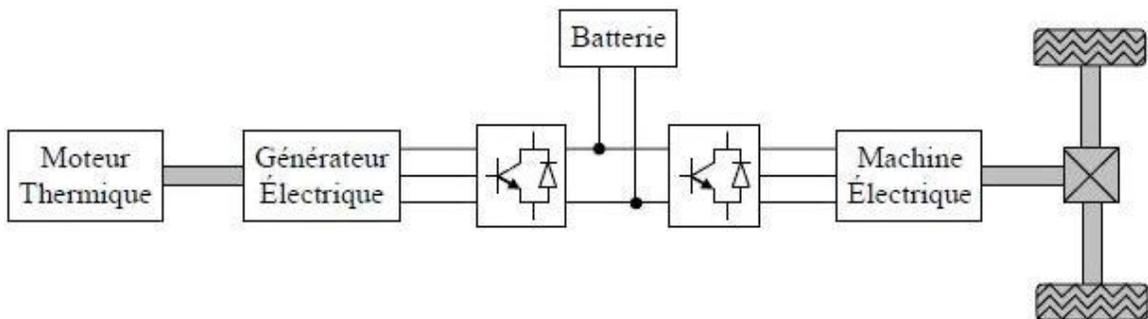


Figure 3.1 - Architecture série

L'hybride parallèle – Dans une structure hybride parallèle (Figure 3.2), le moteur thermique fournit sa puissance aux roues comme pour un véhicule traditionnel. Il est mécaniquement couplé à une machine électrique qui permet de l'assister. La particularité de son couplage lui

donne aussi le nom d'hybride parallèle à addition de couple ou à addition de vitesse selon la structure et la conception du véhicule [2].

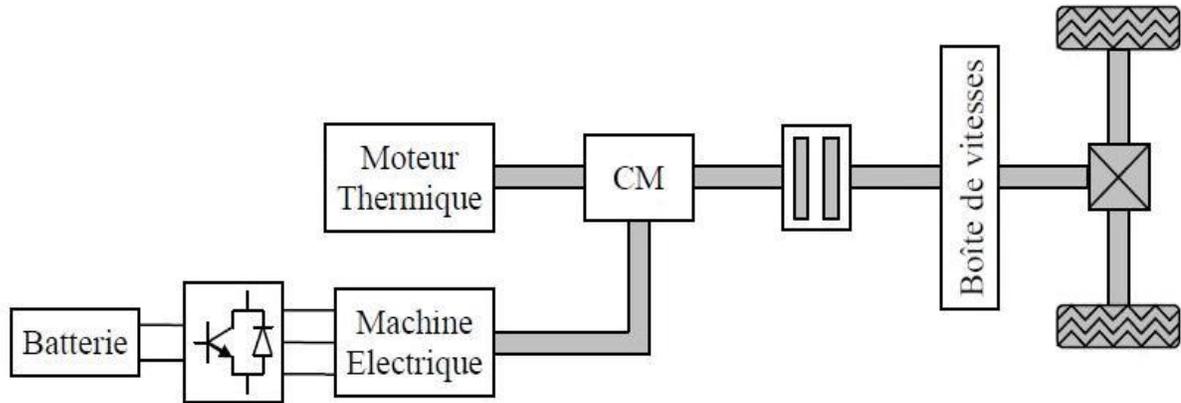


Figure 3.2 - Architecture Parallèle

L'hybride mixte – La structure hybride mixte (Figure 3.3) n'est rien d'autre qu'un hybride parallèle plus spécifique. Mais de part sa complexité, une dissociation entre cette architecture et la structure hybride parallèle paraît judicieuse. Cette architecture résulte de la combinaison entre l'hybridation parallèle à addition de couple et à addition de vitesse. Là encore, diverses possibilités de conception existent, la plus connue étant celle utilisée par le constructeur Toyota. Ce véhicule est constitué de trois machines électriques et d'un train planétaire. La première machine électrique (quelques kW) et la seconde (quelques dizaines de kW) réalise respectivement l'addition de vitesse et l'addition de couple [2].

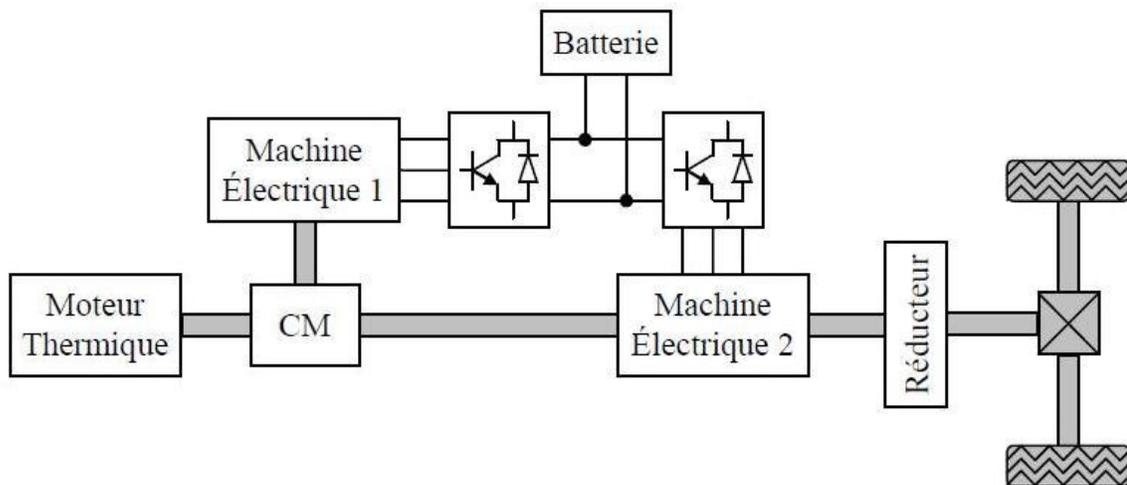


Figure 3.3 - Architecture mixte

3.3 Transmission Intégrale

Un véhicule à transmission intégrale (4x4) possède une motorisation qui permet à ses quatre roues de recevoir un couple moteur en même temps [3]. Cela proportionne un meilleur contrôle du véhicule en différentes surfaces qu'une voiture à seulement deux roues motrices. Deux types de transmission intégrale existent dans un véhicule :

- *Four-wheel drive (4WD)* – Système à temps partiel, destiné uniquement pour un usage dans des conditions de faible adhérence, comme tout-terrain ou sur la neige ou la glace. Le véhicule roule normalement en deux roues motrices (traction pour la plupart des véhicules de ce type) [4].
 - **Avantages** : le système prend peu de place et se révèle économe en carburant.
 - **Désavantages** : le système est moins réactif, par rapport à une transmission intégrale permanente.
- *All-wheel drive (AWD)* - Système à temps plein, destiné à tous les types de surfaces, dont la plupart d'entre eux ne peut pas être éteint [4].
 - **Avantages** : énorme gain de motricité.
 - **Désavantages** : le système prend beaucoup de place et consomme plus de carburant.

Dans un 4x4, les deux essieux doivent être alimentés en même temps. Étant donné que normalement le moteur thermique se place à l'avant, il faut ajouter au véhicule un arbre de transmission, qui transmet la puissance aux roues arrières, et un différentiel arrière plus un différentiel central. La Figure 3.4 illustre la configuration d'un véhicule à quatre roues motrices.

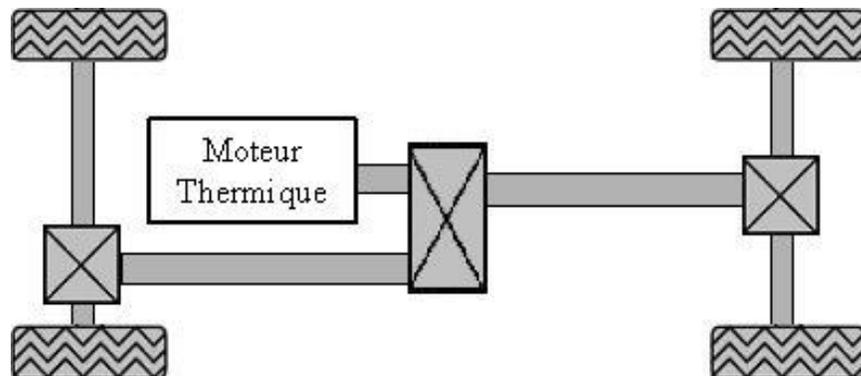


Figure 3.4 - Transmission intégrale

L'architecture 4x4 dans un véhicule hybride possède un énorme avantage grâce à son unité motrice arrière, qui comprend son propre moteur électrique. Cette configuration permet que l'essieu arrière soit mécaniquement indépendant du groupe motopropulseur avant et ne nécessite donc ni boîte de transfert, ni connexion par arbre de transmission, ce qui économise considérablement l'espace.

3.4 Etude de la concurrence

3.4.1. PSA 3008

En conjoint avec BMW, PSA a développé un full hybride à moteurs thermique à l'avant et électrique à l'arrière (Figure 3.5) [5].

Le véhicule est composé d'un moteur thermique placé à l'essieu avant, un moteur électrique à l'arrière, un alternateur-démarrageur et une batterie nickel-métal hydrure.

Le système *stop-start* est assuré par l'alternodémarrageur, qui sert à couper et relancer le moteur thermique et aussi parfois relayer la batterie HT pour alimenter le moteur électrique en mode transmission intégrale.

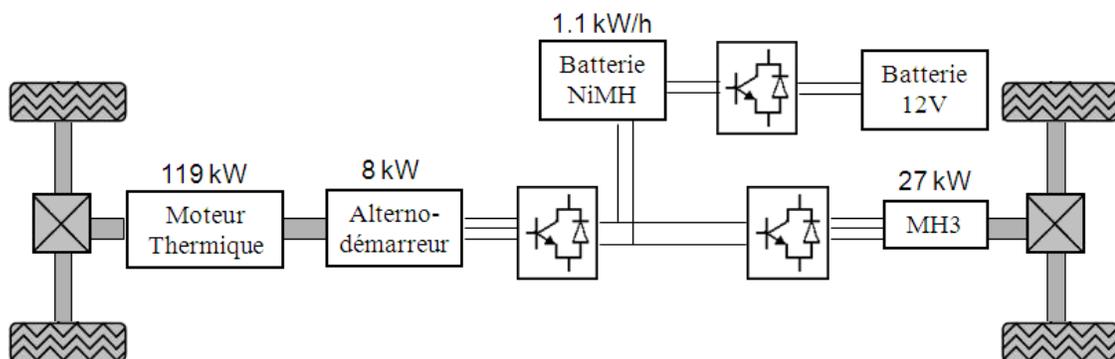


Figure 3.5 - PSA 3008

La voiture peut rouler en 4 modes distinctes à être choisi par le conducteur manuellement [5]:

- *Automatique* : Mode de conduite optimale qui cherche la meilleure stratégie à tout moment pour diminuer la consommation de carburant. Ces modes de roulage sont montrés dans le Tableau 3.3;

- *Sport* : Le dynamisme est privilégié. Le moteur électrique lisse les ruptures de charge qui rythment les changements de vitesse automatisés ;
- *4WD* : les 4 roues sont motrices dont le train arrière électrique apporte un coup de pouce ;
- *ZEV* : mode tout électrique. Dans ce mode, il est possible d'accélérer jusqu'à 60km/h et avoir 2km de autonomie seulement avec la batterie.

Tableau 3.3 - Modes de roulage du mode *Automatique* de la PSA3008

PSA 3008				
Full Hybrid				
Phases de roulage	Moteur therm (119kW)	Moteur élec. avant (8kW)	Moteur élec arrière (27kW)	Observations
A l'arrêt	A l'arrêt	A l'arrêt	A l'arrêt	
Démarrage	A l'arrêt	A l'arrêt	En marche	
Basse vitesse	En marche	En marche	En marche	L'alternateur démarre le moteur thermique
Haute vitesse	En marche	A l'arrêt	A l'arrêt	
Décélération	A l'arrêt	A l'arrêt	Générateur	Freinage récupératif
Accélération	En marche	A l'arrêt	En marche	
Le système détecte automatiquement les faibles adhérences et passe au mode 4x4.				

3.4.2. Lexus RX400h

Le *Lexus RX400h* est un véhicule hybride dont l'essieu avant comprend un moteur thermique, un moteur électrique (MH2) et un générateur (MH1), et l'essieu arrière comprend un deuxième moteur électrique.

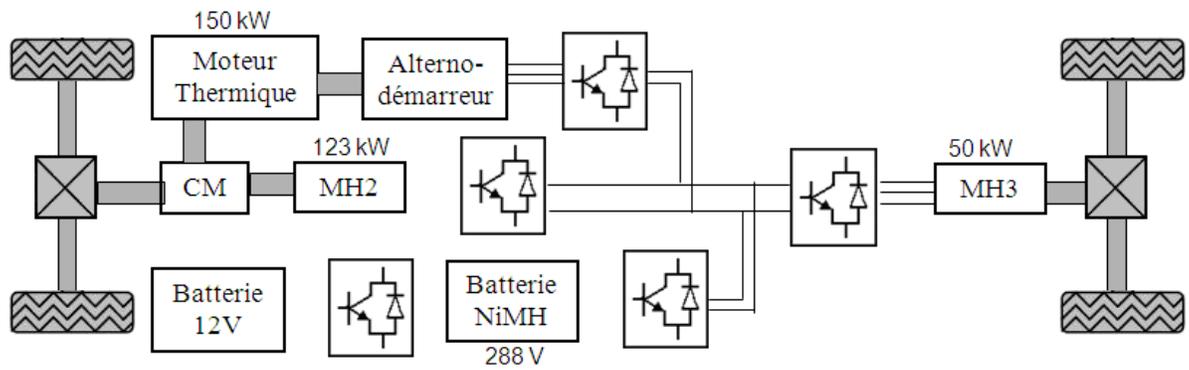


Figure 3.6 - Lexus RX400h

La puissance du moteur thermique se divise en deux parties : 72% mécaniquement vers les roues et 28% électriquement prélevé par le générateur. Les moteurs électriques avant et arrière n'utilisent donc que les 28% donnés par le moteur V6 et la puissance maximale de la batterie, soit 61 ch (45 kW). Le total, 211 ch du moteur V6, plus les 61 ch des batteries font bien 272 ch [6].

Les modes de roulage du Lexus sont montrés dans le Tableau 3.4 [6].

Tableau 3.4 - Modes de roulage du Lexus RX400h

Lexus RX400h				
Full Hybrid				
Phases de roulage	Moteur therm (150kW)	Moteur élec. avant (123kW)	Moteur élec ar-rrière (50kW)	Observations
Il y a un générateur qui prélève toujours 28% de la puissance délivrée par le moteur thermique				
A l'arrêt	A l'arrêt	A l'arrêt	A l'arrêt	System stop-start
Démarrage	A l'arrêt	En marche	A l'arrêt	La mise en action du moteur therm. est assurée par entraînement des roues motrices au générateur et donc sans dispositif de démarrage
Basse vitesse	A l'arrêt	En marche	A l'arrêt	
Marche avant normal	En marche	En marche	A l'arrêt	La distribution de la puissance est gérée de manière à optimiser l'efficacité.
Décélération	En marche	Générateur	Générateur	Freinage Recuperatif
Accélération	En marche	En marche	En marche	La batterie apporte une énergie supplémentaire pour accroître la puissance
	En conditions normales, le système opte pour la traction, le moteur à l'arrière restant inactive. Il n'est activé que quand l'électronique de commande régule la répartition du couple entre les essieux, à cause d'accélération ou revêtements glissants, etc.			

3.5 Architecture Mild Hybrid 4x4 Valeo

Le but de la nouvelle architecture est de mettre en place une voiture *Mild Hybrid*, avec transmission 4x4. Pour réaliser un véhicule hybride à transmission intégrale, on propose dans l'essieu avant un moteur thermique associé à un moteur électrique MH1, et dans l'essieu arrière

un deuxième moteur électrique, MH3. La Figure 3.7 illustre la configuration des moteurs du véhicule.

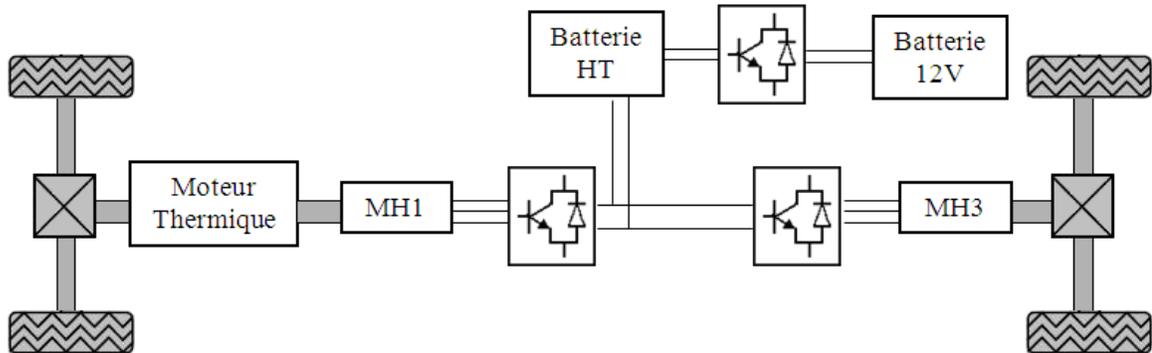


Figure 3.7 - Architecture du véhicule hybride

Valeo propose une architecture comme le full hybrid 3008 de PSA, par contre avec un système beaucoup moins cher. Etant un véhicule mild hybrid, les machines seront moins puissantes et la batterie avec un niveau de tension plus bas.

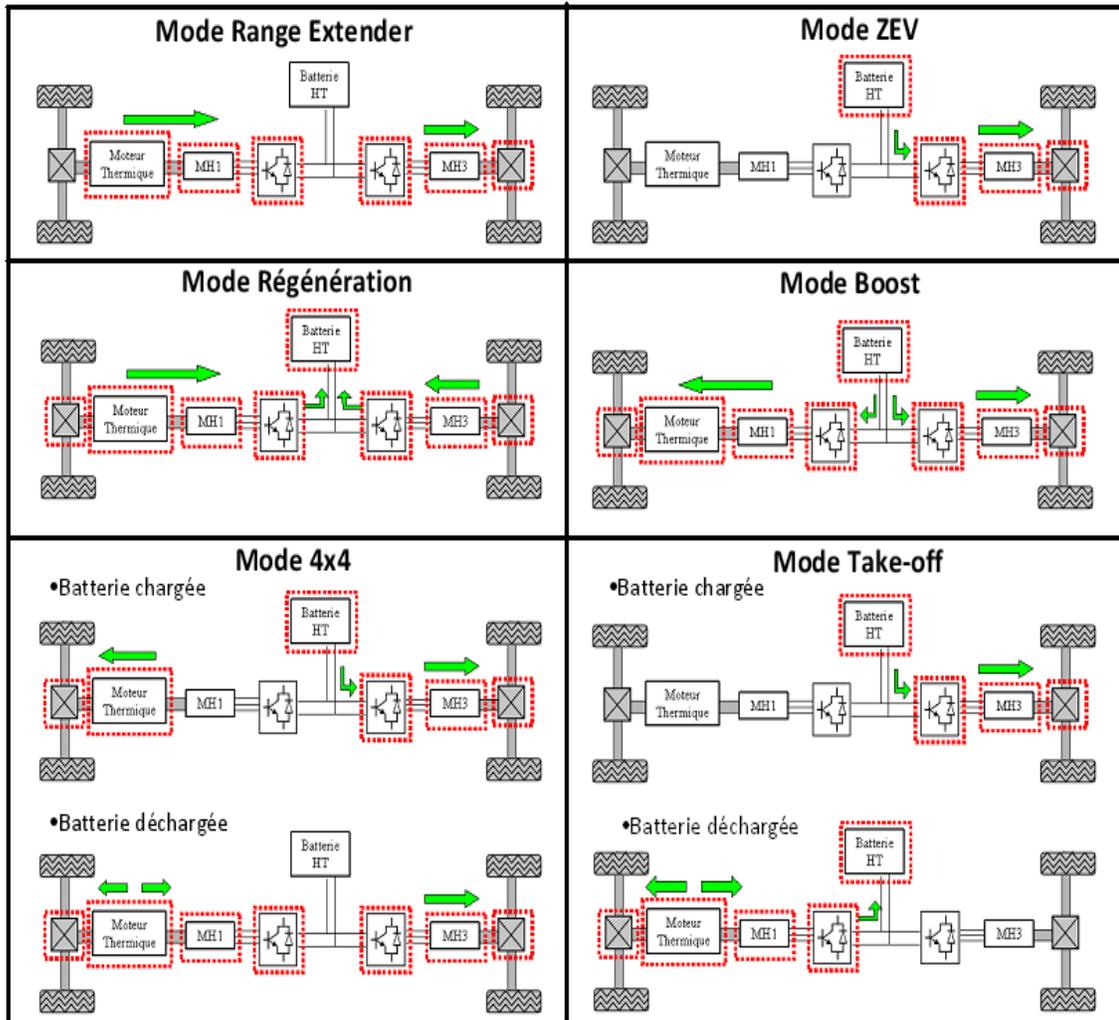
On établit les modes de roulage qu'on pourrait utiliser dans notre architecture.

La machine MH1 fonctionnera comme un alternateur-démarrateur standard qui sert à assurer la fonction *stop&start* et prélever la puissance du moteur thermique quand nécessaire.

La deuxième machine, MH3, aura plusieurs fonctionnements possibles, illustrés au Tableau 3.5:

- *Range Extender* : le moteur thermique, dans son meilleur point de rendement, fournit la puissance au moteur électrique ;
- *ZEV* : mode toute électrique, dont la machine électrique MH3 propulse le véhicule toute seule ;
- *Régénérateur* : réalisation du freinage récupératif et stockage de l'énergie dans la batterie haute tension ;
- *Boost* : assistance au moteur thermique en phases de grandes accélérations ;
- *4x4* : assurance de la transmission intégrale.
- *Take off* : assistance au moteur thermique au moment du démarrage du véhicule.

Tableau 3.5 - Modes de roulage possibles



C'est sur le mode *Range Extender* qu'on va donner notre attention pour la suite.

Le *Range Extender* est une nouvelle stratégie utilisée par les fabricants de véhicules pour augmenter l'autonomie des voitures électriques. En plus d'avoir une machine électrique et une batterie, comme dans les véhicules électriques classiques, le système *Range Extender* ajoute encore à l'ensemble un moteur thermique et un générateur. Si dans un certain moment la batterie est complètement déchargée, le moteur thermique transmet son énergie mécanique au générateur, qui charge la batterie. L'idée alors est d'avoir dans la voiture hybride le système *Range Extender* en plus.

On sait qu'un moteur à combustion est une machine à bas rendement, qui est encore plus bas à basses vitesses. La Figure 3.8 montre la courbe de rendement du moteur thermique qui sera

utilisé dans les simulations du §4. Si on fait que la puissance du moteur thermique soit envoyée vers la chaîne électrique au lieu d'aller directement aux roues, on peut gérer cette puissance de façon à faire le moteur thermique fonctionner toujours dans un bon point de rendement.

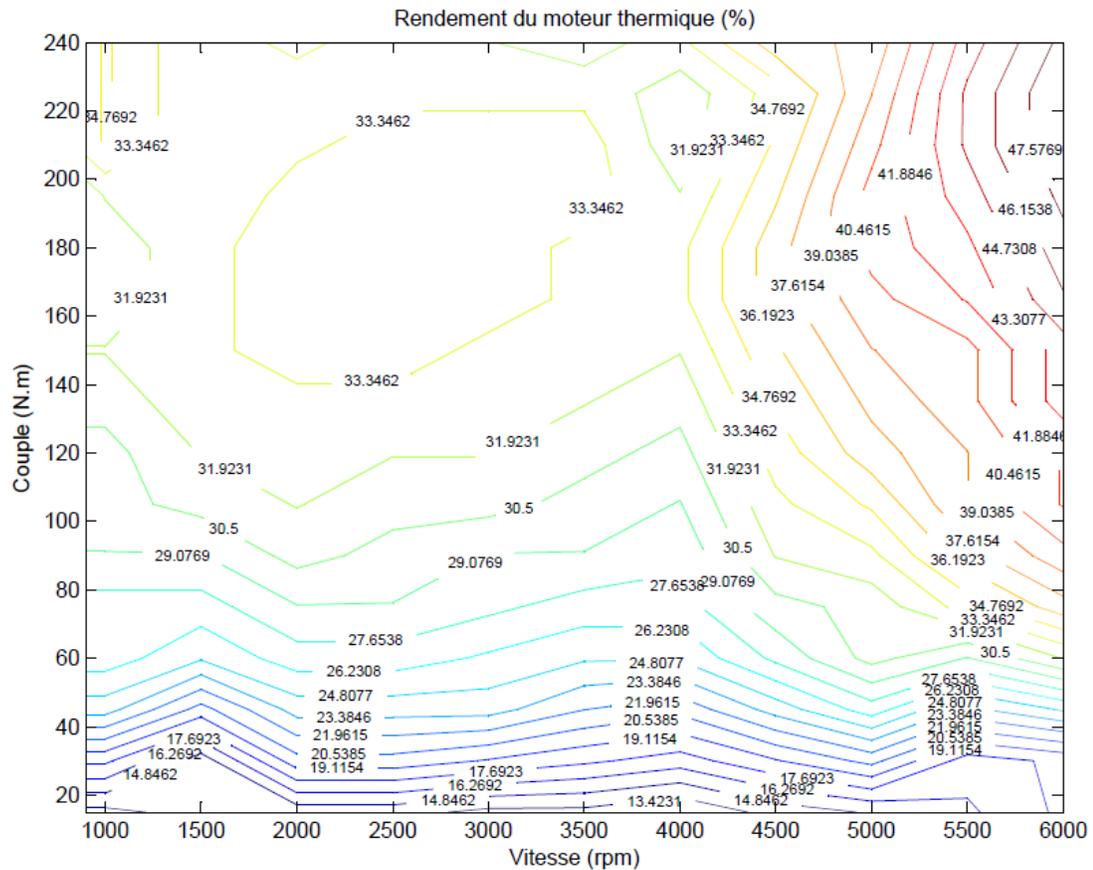


Figure 3.8 - Rendement d'un moteur thermique

Le problème de passer par la chaîne électrique c'est que la batterie connectée détermine la tension. Vu qu'il y a une limite de courant pour le stockeur, la puissance est alors limitée. Pour pouvoir donc passer plus d'énergie, quand le véhicule fonctionne comme *Range Extender*, on déconnecte la batterie et alors on peut monter en tension et, par conséquent, en puissance.

3.6 Conclusion de l'état de l'art

La faisabilité de cette stratégie dans un véhicule mild hybride n'est pas encore connue et donc il faut réaliser une étude pour vérifier le gain en CO₂ par rapport à un véhicule classique avec la fonction REX.

Pour connaître alors l'efficacité de cette stratégie de fonctionnement, un bilan énergétique est nécessaire. Par conséquent, la poursuite de ce rapport sera une étude en simulation de ces modes, à partir d'un profil de roulage préétabli.

4 Etude Energétique

L'étude énergétique consiste à mettre en place les différentes stratégies proposées et comparer leur consommation de carburant et l'émission de CO_2 final dans un cycle de roulage à fin de trouver le meilleur rapport coût bénéfice qu'on peut avoir. Parmi les modes de fonctionnement proposés au §3.5, comme dans le Mode Auto de la PSA3008 (§3.3), on va chercher un mode optimale de gérer le transfert de puissance pour qui la voiture soit la plus économique possible.

Les essais seront réalisés à l'aide du logiciel AMESim, version 11. Il est un logiciel de simulation pour la modélisation et l'analyse de systèmes 1D multi-domaines. Les composants du modèle sont décrits en utilisant des modèles analytiques validés qui représentent le comportement réel hydraulique, pneumatique, électrique ou mécanique, du système [7].

4.1 Définition du cahier de charges

Les simulations furent réalisées à partir d'un modèle de base déjà utilisé par Valeo. Les paramètres, pris d'un modèle dans Amesim, version 7, furent adaptés pour la version plus nouvelle et utilisés pour la suite de cette étude.

Dans l'étude énergétique, chaque moment du cycle sera analysé séparément avec les différentes possibilités de roulage. Le dimensionnement des composants ainsi comme les paramètres d'utilisation seront prises en compte.

4.1.1. Cycle de roulage

Dans cette étude, le cycle NEDC sera utilisé comme profil de roulage à suivre. Le cycle consiste en 4 cycles urbains (appelés ECE) et un cycle extra-urbain (appelé EUDC), qui parcourent 11km en 1200s. Le profil du cycle est montré dans la Figure 4.1.

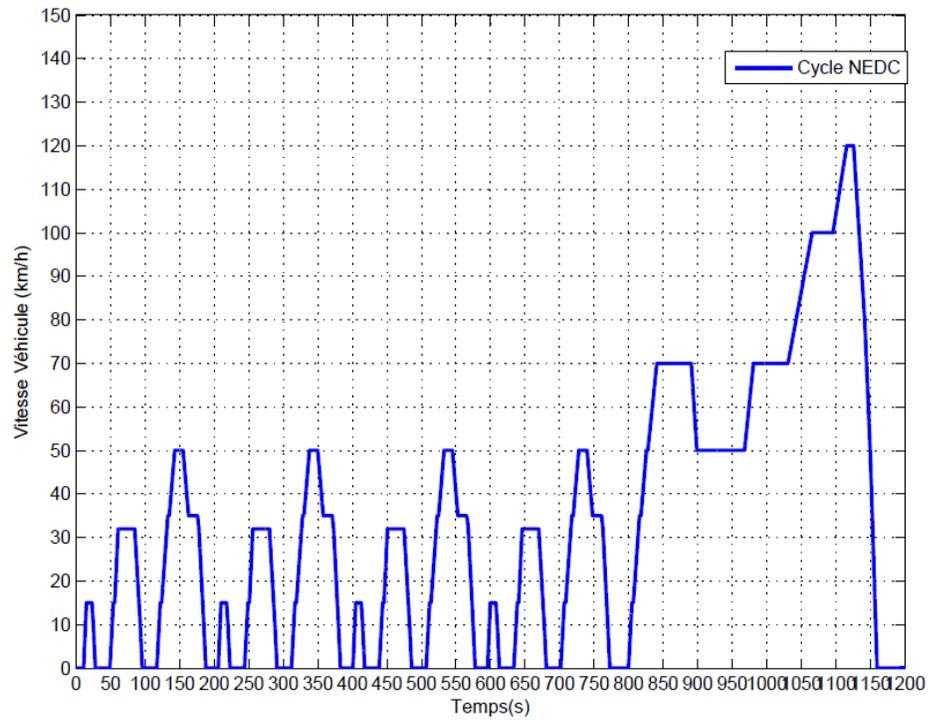


Figure 4.1 - Cycle NEDC

4.1.2. Paramètres du véhicule

Le véhicule utilisé pour les simulations a été le Laguna II GT. Les paramètres de la chaîne de traction sont exposés au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 - Paramètres de la chaîne de traction

Paramètres de la chaîne de traction		Valeurs
Front end	Rapport	2.5
	Frottement	Est intégré dans le PMF du moteur
Boîte de Vitesses	Rapport 1	3.909 (V1000=7.7 km/h)
	Rapport 2	2.105 (V1000=14.3 km/h)
	Rapport 3	1.4827(V1000=20.3 km/h)
	Rapport 4	1.1025 (V1000=27.2 km/h)
	Rapport 5	0.8974 (V1000=33.5 km/h)
	Rapport 6	0.7561 (V1000=39.7 km/h)
	Différentiel	3.7647
	Efficiences	L'efficacité des rapports est supposée constante et ne dépend pas de la température : 95% - Rapport 1 90% - Rapport 2 86% - Rapport 3 84% - Rapport 4 80% - Rapport 5 77% - Rapport 6
Véhicule	Masse du véhicule	1640 Kg (<i>L'effet d'inertie des roues de 50kg est incluse</i>)
	Pneu & pertes aérodynamiques	$Pertes = \frac{1}{2} * \rho_{air} * S * C_x * V * V + Masse * g * C_r$ Dont $\rho = 1,205 \text{ kg.m}^3$ $S = 2,201 \text{ m}^2$ $C_x = 0,293$ (<i>null</i>) V en (m/s) $C_r = 0,006329$
	Rayon du pneu	0.31 m

4.1.3. Moteur thermique

Le moteur du Laguna II GT est un modèle essence de 1,998l, 4 temps, développant une puissance de 165 ch (122 kW).

Le modèle de moteur thermique du logiciel Amesim est une source mécanique délivrant un couple et recevant une vitesse angulaire. Il calcule le couple, les émissions (CO2, CO, HC, NOx, suie) et la consommation de carburant ainsi que le débit des gaz d'échappement et les pertes

thermiques à combustion. Les émissions de CO₂ sont estimées à partir de la consommation de carburant.

Le modèle est donné sous la forme d'un tableau de points. Cette table est couramment appelée « cartographie » dans le milieu automobile. Elle vise à représenter le moteur d'une manière empirique par une quantification numérique. Sur la Figure 4.2 la cartographie du moteur utilisé est représentée. La courbe représente le couple maximal demandé ($\alpha=1$) et le couple de traînée (frein moteur $\alpha = -0.1$).

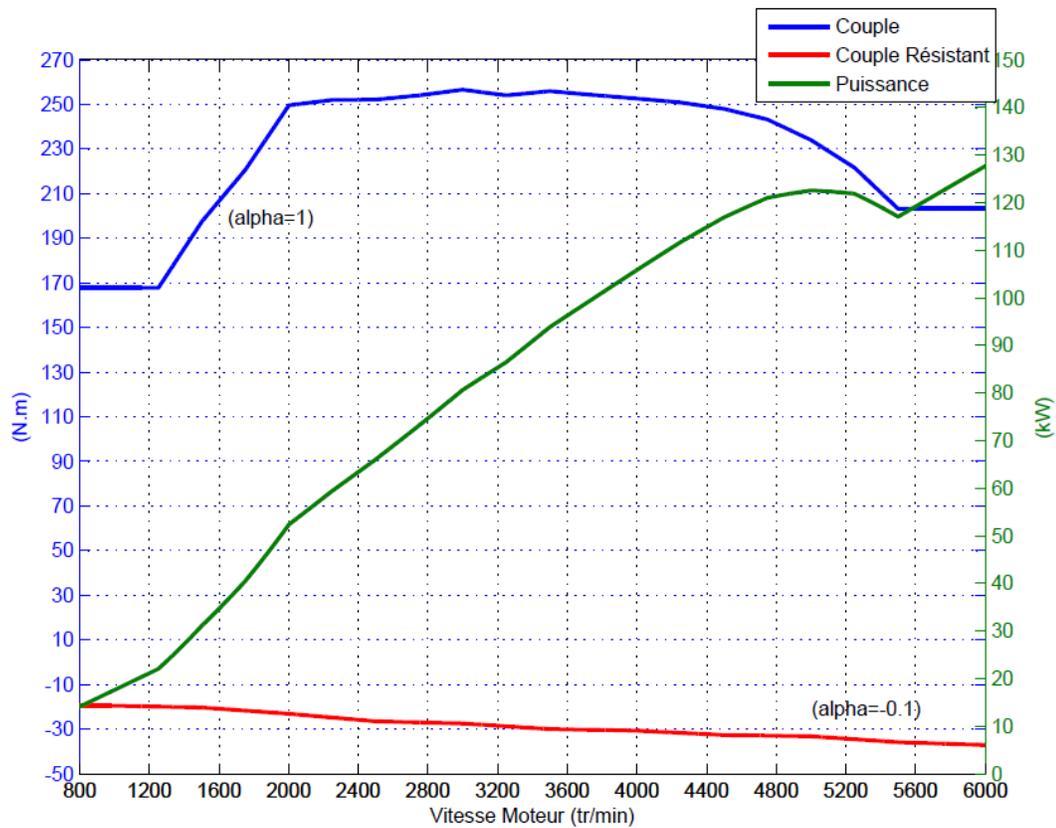


Figure 4.2 - Cartographie du moteur thermique

Le pouvoir calorifique du gasoil est de 42,5 MJ/kg. Le carburant brûlé fournit une certaine énergie, qui est transformée en énergie mécanique par le mouvement du vilebrequin avec une efficacité quelconque. La puissance utile de sortie du moteur est donc la puissance du vilebrequin moins les pertes par frottement du moteur. La Figure 4.3 illustre les transformations décrites.

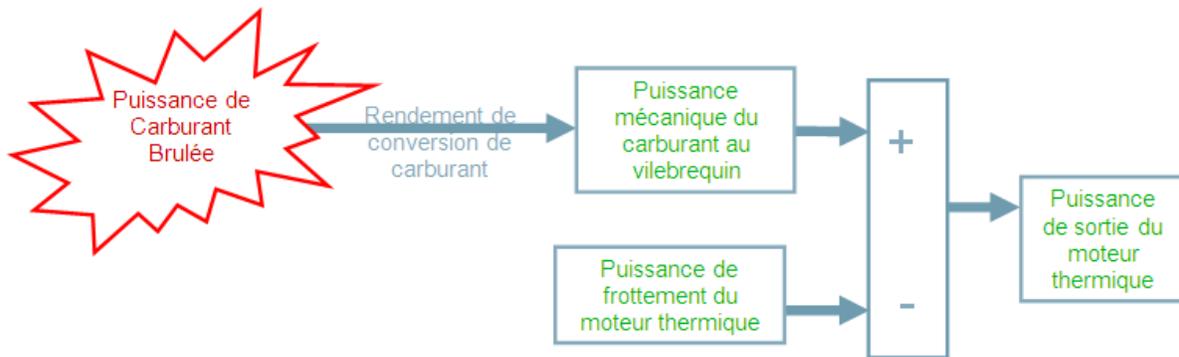


Figure 4.3 - Représentation du transfert de puissance dans le moteur thermique

Un essai avec le moteur a été réalisé pour que le rendement du moteur soit connu. Le logiciel nous donne directement la consommation de carburant en fonction du temps (g/s). On transforme cela en puissance (kW) :

$$P_{carburant}(kW) = Consommation \left(\frac{g}{s} \right) * 0.01222 * 3.6$$

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{P_{carburant}}$$

A l'aide du logiciel Matlab et à partir des équations précédentes, nous avons pu établir la courbe de niveau du moteur du Laguna II GT, dans la Figure 3.8, au §3.5 dont le rendement typique c'est 36%.

D'autres rapports de conversion du moteur importants sont :

- 1 l/100km carburant = 23.5 l/km grammes de CO2
- Densité de l'huile = 0.75 kg/l

4.1.4. Stockeurs d'énergie

Les VEH d'aujourd'hui ont deux options de stockeur d'énergies différentes : la batterie et les super condensateurs. Avec des comportements très différents, le choix entre les deux dépend plutôt des fonctions auxquelles on prétend réaliser avec le stockeur. Le Tableau 4.2 [9] représente les principales différences entre les deux.

Tableau 4.2 - Différence entre les stockeurs d'énergie

	Batteries	EDLC Super condensateur
Mode de stockage d'énergie	chimique	physique
Energie spécifique	30-200Wh/kg	≤ 5 Wh/kg
Puissance spécifique	<1 kW/kg	1-10kW/kg
Cycle de vie	10^3 cycles	10^6 cycles
Temps de décharge 100%	quelques minutes ou plus	quelques secondes ou moins

Une batterie peut stocker plus d'énergie total que la capacitance, mais elle ne peut pas la délivrer très rapide (basse puissance spécifique). Les capacitances, par contre, peuvent stocker moins d'énergie (basse énergie spécifique), mais tout ce qu'il a stocké peut être déchargé rapidement et produire beaucoup de puissance [10].

Pour cette raison, les super condensateurs ne servent qu'à fonctionner au mode *boost*, dont le véhicule a besoin d'une grande quantité de puissance rapidement. Vu que c'est dans ces moments que le moteur thermique a le pire rendement, il serait peut être intéressant de ajouter un Ucap, au lieu d'une batterie, que servirai dans le véhicule à récupérer l'énergie du freinage et aider aux moments des accélérations à basse vitesse.

4.1.4.1 Batterie Lithium-ion

La batterie proposée pour la simulation est une lithium-ion 48V. Pour la simulation, on prendra comme base les paramètres d'une batterie réelle produite par le groupe Saft¹ [8].

Chaque cellule du groupe possède une tension de 3.6V, dont on aura besoin de 13 cellules en série avec une capacité totale de 6.5 A.h. La décharge des cellules se fait selon la courbe de la Figure 4.4. Quand la batterie est 100% chargée, une cellule possède une tension de 4.0V.

¹ Saft est un groupe qui réalise la conception et la fabrication de batteries de haute technologie pour des applications industrielles et de défense.

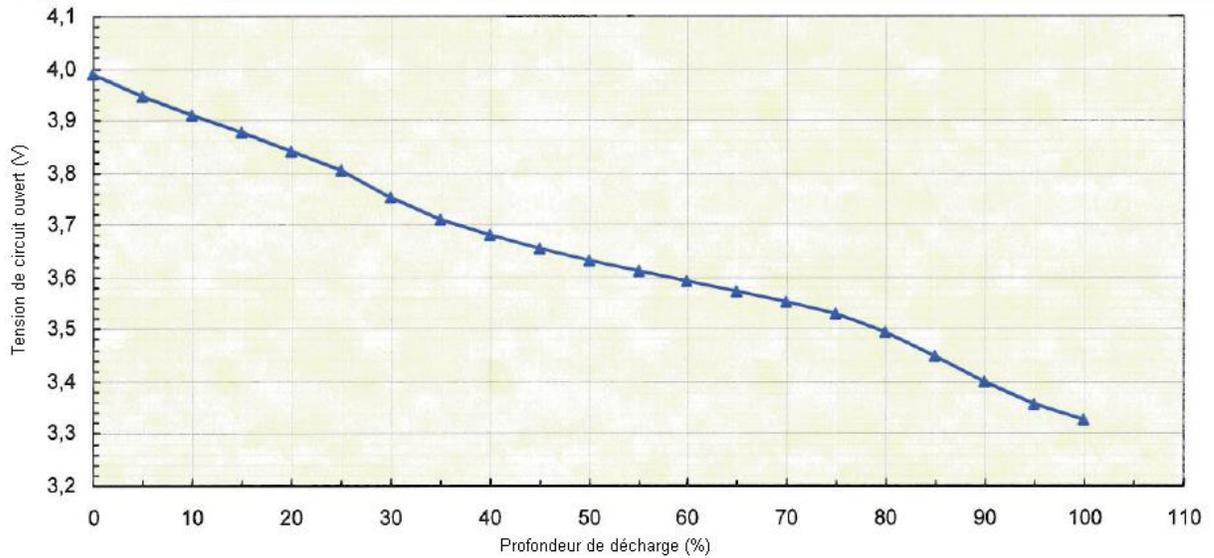


Figure 4.4 - Caractéristique d'une cellule lithium-ion

.Pour améliorer la durée de vie de la batterie, le fabricant conseille de rester toujours entre 30% et 70% de charge, donc la tension d'une cellule sera toujours entre 3.75 et 3.55, dont l'ensemble sera entre 48V et 46V.

Il faut aussi prendre compte de la limitation de courant du stockeur. La batterie doit fonctionner selon les paramètres du Tableau 4.3. La simulation sera réalisée à une température de 25°C.

Tableau 4.3 - Limites de courant de la batterie lithium-ion

Courant de décharge (A)	-30°C	-18°C	-10°C	0°C	25°C	40°C
Pulses de 2s	160	230	310	350	350	350
Pulses de 5s	160	230	310	350	350	350
Pulses de 10s	160	230	310	350	350	350
Pulses de 18s	160	230	310	310	350	350
Pulses de 30s	160	230	310	310	310	310
Continu	50	130	190	250	250	250
Courant de charge (A)						
Pulses de 2s	30	52	78	130	260	260
Pulses de 5s	30	52	78	130	260	260
Pulses de 10s	30	52	78	130	260	260
Pulses de 18s	30	52	78	130	260	260
Pulses de 30s	30	52	78	130	260	260
Continu	2	3	6	13	65	65

Selon le fabricant, on prendra aussi compte de la résistance interne de la batterie, qui varie dans chaque cellule avec la profondeur de décharge selon le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 - Résistance interne - Batterie

Profondeur de décharge (%)	Résistance interne (mΩ)
20	2,04
30	1,95
40	1,93
50	1,93
60	1,98
70	2,11
80	2,27

4.1.4.2 Super Condensateur

D'un point de vue technico-économique, une capacité de 5000F sera la plus adaptée selon nos besoins de récupération des freinages du profil NEDC. On prendra comme base pour la simulation les Ucap du fabricant Nesscap².

Chaque capacité possède une tension de 2,7V, dont on aura besoin de 19 capacités en série pour avoir 48V et une certaine marge, ce qui donnera une capacité totale de 263F. La résistance interne en continu est égal à 0,33mΩ et indépendant de la profondeur de décharge, dont les 19 capacités donnent une résistance de 6,27 mΩ.

Le fabricant présente une limite de courant de 2547A pour un pulse de 1s, alors beaucoup plus grande que celle de la batterie lithium-ion.

4.1.5. Machines Electriques

Pour réaliser la simulation dans le logiciel Amesim, on prendra le modèle d'une machine électrique monophasée à paramètres constants. Il faut donc déterminer la puissance, le couple et la vitesse angulaire maximale, ainsi comme la valeur du rendement constant. On prendra comme 90% comme rendement constant.

Si on propose d'avoir un VEH classique, sans vouloir déconnecter la batterie, la puissance envoyée aux machines est donc limité par la puissance maximale que le stockeur peut fournir. Pour bien comparer, pour les cas de deux stockeurs différents, on prendra la limite de puissance de la batterie lithium-ion.

Celle-ci à une tension maximale de 48V, vu qu'il faut rester au dessous de 70%, et un courant maximal de 350A, mais qu'on va maintenir à 250A pour questions de sécurité.

$$P_{max_{batt}} = V_{max_{batt}} * I_{max_{batt}} = 11.2 kW$$

$$P_{sortie} = P_{max_{batt}} * \eta_{MH3} \approx 10 kW$$

² Nesscap est un leader mondial en technologie des ultra condensateurs avec électrodes de propriété et procédés de fabrication.

La taille de la machine électrique MH1 dépend des fonctions qui le sont envisagés. Si le stockeur ne sert qu'à récupérer l'énergie du freinage et réaliser du mode *boost*, la fonction *générateur* n'existe pas, donc l'alternateur servira juste à réaliser le *stop&start* et peut avoir une puissance plus petite. Si on envisage le mode *générateur* pour augmenter le temps du mode ZEV, la puissance de la machine va varier selon le besoin de la rapidité de recharge du stockeur.

L'ajout du mode *Range Extender* implique un changement dans la taille des machines. Dans cette configuration, on envisage le transfert de puissance par la chaîne électrique jusqu'à environ 50 km/h, le cycle urbain du profil NEDC. Le mode ZEV sera utilisé jusqu'à sa puissance maximale, ou jusqu'à ce qu'il n'a plus de charge disponible, et après c'est le moteur thermique, à travers les machines électriques qui roulera le véhicule.

Il faut donc connaître le besoin de puissance du véhicule dans le cycle NEDC pour désigner la taille nécessaire des machines. La Figure 4.5 montre les puissances demandées par les roues dans le profil de roulage.

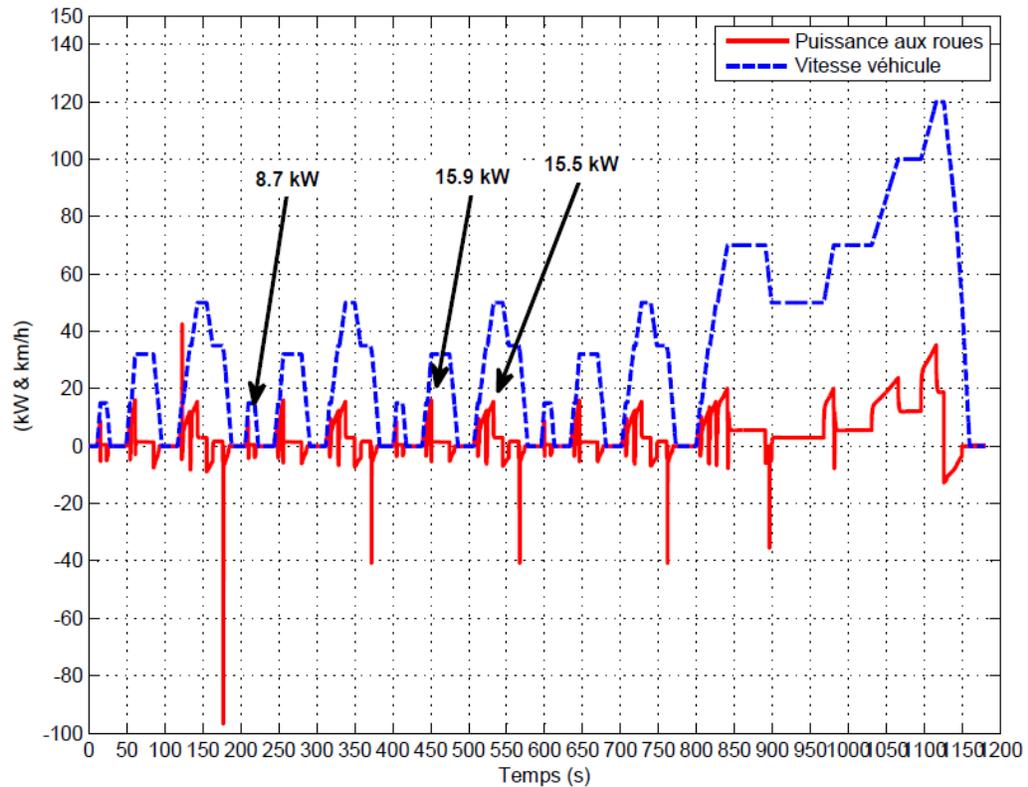


Figure 4.5 - Puissance demandé aux roues du véhicule

Pour pouvoir atteindre le niveau de puissance suffisant pour réaliser tout le cycle ECE, il nous faudra une machine MH3 qui puisse délivrer 15.9kW. Avec un rendement de 90%, la machine devrait réaliser 17 kW, par contre nous avons choisi de sous-estimer la puissance et utiliser 16 kW, ce qui ne pose pas un problème dans les simulations suivantes.

La machine MH1, qui va recevoir la puissance du moteur thermique, doit prendre en compte le rendement d'elle-même et de la machine MH3. Nous avons donc :

$$P_{MH1} = P_{sortie} * \eta_{MH3} * \eta_{MH1} \simeq 17 kW$$

4.2 Simulations et résultats

4.2.1. Analyse des modes de roulage

Pour bien choisir le meilleur moment pour utiliser chaque mode de roulage, une comparaison entre chaque un sera réalisé pour chaque moment distinct du profil de roulage.

4.2.1.1 Range Extender

Pour qu'on puisse choisir le meilleur point de fonctionnement pour le moteur thermique une analyse de la Figure 4.6 par rapport à la Figure 3.8 se fait nécessaire. A travers la courbe de puissance, on peut trouver le meilleur rapport vitesse/couple de l'engin.

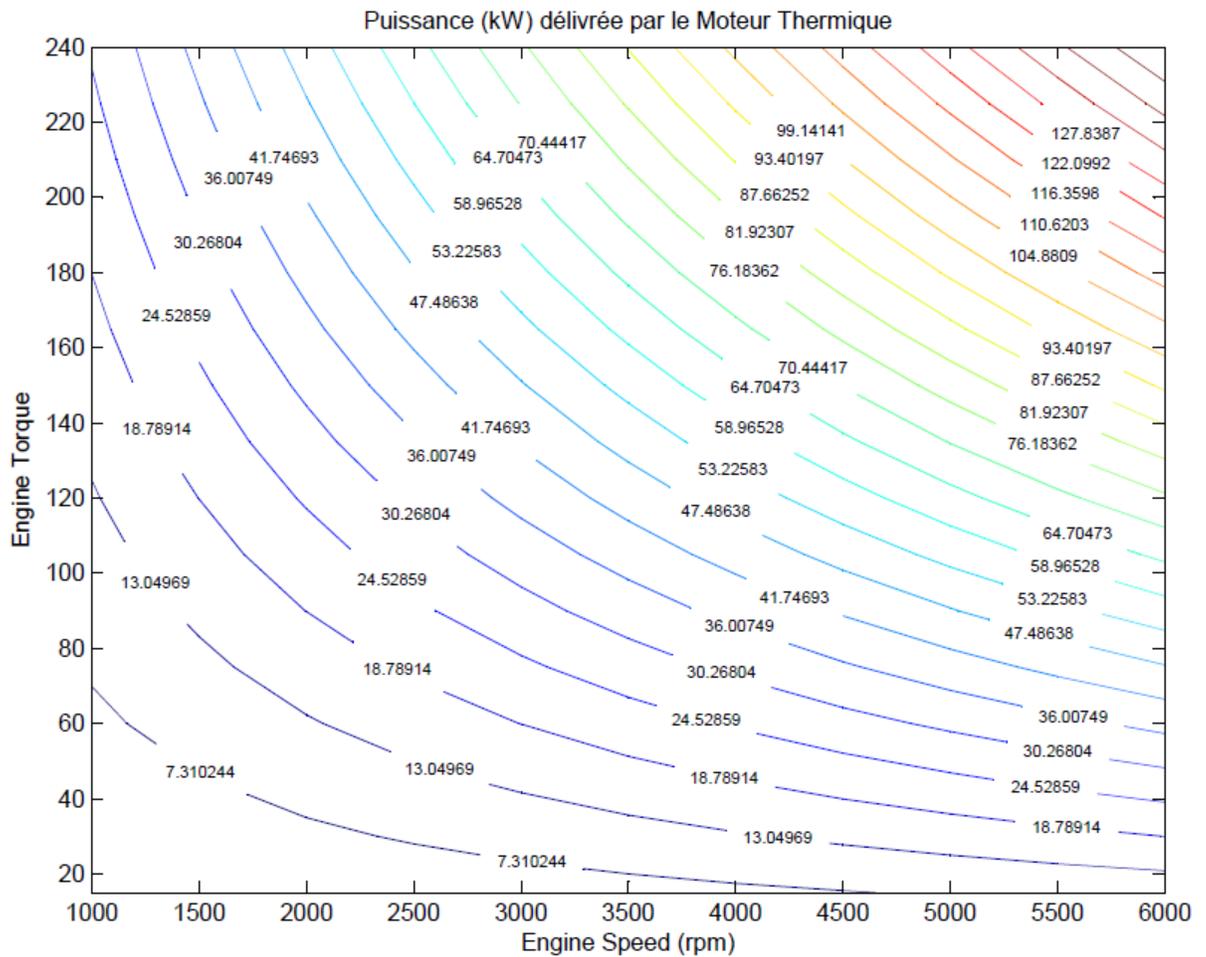


Figure 4.6 - Puissance délivrée par le moteur thermique

Pour tout le besoin de puissance < 10 kW, on se mettra à la vitesse la plus basse possible pour forcer une augmentation du couple et donc améliorer le rendement, dont on choisira environ 900 rpm. Pour monter jusqu'à 16 kW, il vaut mieux augmenter la vitesse de rotation à environ 1200 rpm pour que le couple envoyé à la machine MH3 ne soit pas trop grand.

L'analyse sera partagée entre les différentes phases de roulage selon les figures 4.7 et 4.8.

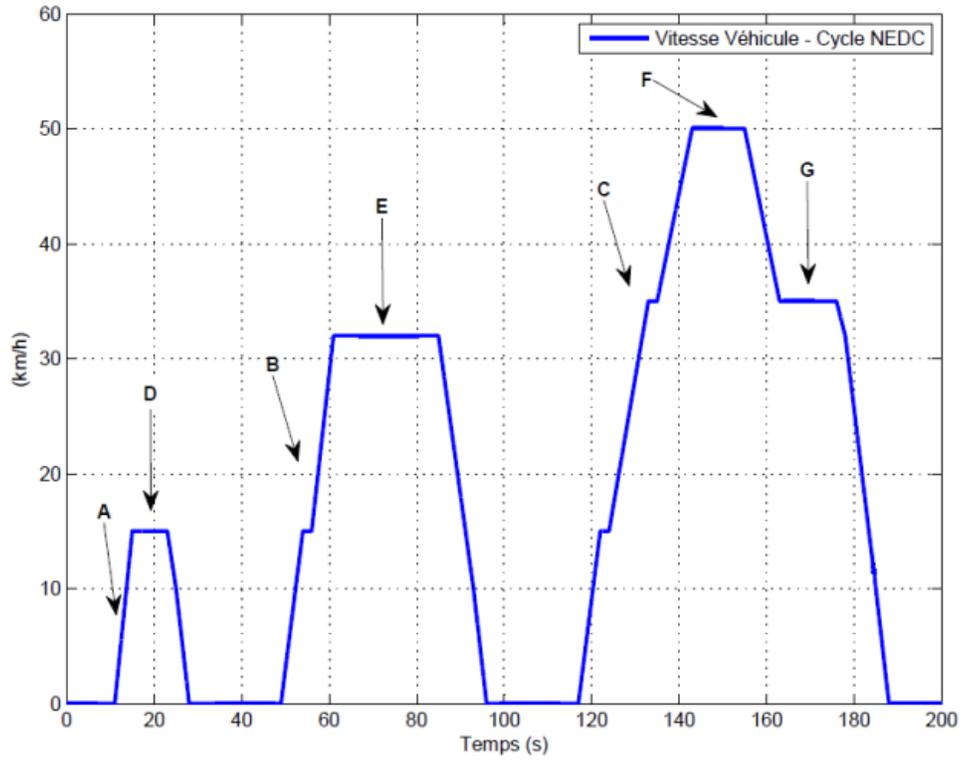


Figure 4.7 - Phases de roulage 1

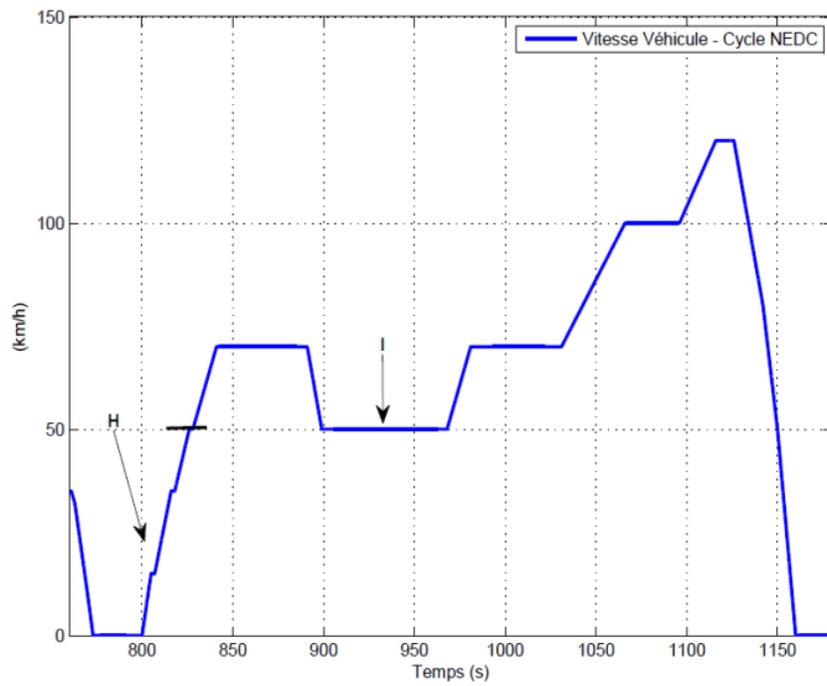


Figure 4.8 - Phases de roulage 2

En comparaison avec un véhicule classique, c'est-à-dire sans système hybride, voici au Tableau 4.5 le gain apporté pour ce mode dans les phases.

Tableau 4.5 - Gain en carburant du mode *Range Extender*

Accélération				Plateaux				
A	B	C	H	D	E	F	G	I
35%	18%	14%	12%	39%	39%	22%	39%	23%

L'analyse de ces résultats montre que le plus petit est le besoin de puissance du véhicule, plus de gain de carburant le mode *Range Extender* apporte au système.

4.2.1.2 Générateur

Le mode générateur nécessite le choix du point de fonctionnement. Vu que le stockeur a une puissance maximale de 10 kW, le point optimal a été choisi comme :

$$\omega_{MH1} = 1200 \text{ rpm}$$

$$C_{MH1} = 85 \text{ N.m}$$

Cette stratégie est mise en place toujours quand la batterie atteint un niveau de charge de 30% et on la demande d'envoyer de la puissance. Le moteur thermique donc, à travers la machine MH1, la recharge jusqu'à environ 50%, pour qu'elle ait encore de l'énergie pour dépenser et encore d'espace pour se recharger à travers un freinage quelconque.

Dans le cycle NEDC, avec une récupération d'énergie en MH3, ce mode n'a même pas été nécessaire dans les stratégies qui suivent.

4.2.1.3 ZEV

Pour la suite de l'étude, la batterie lithium-ion a été choisie, au lieu des super capacités. Cette décision a été prise basée sur la meilleure relation coût-bénéfice, après opinion des spécialistes en stockeurs d'énergie.

Au moment dont la fonction *ZEV* est active, le moteur thermique se met au ralenti ($\omega_{Mth} = 700 \text{ rpm}$), car on ne considère pas dans cette simulation le mode *stop&start*. Dans

ces moments, l'engin a la plus petite consommation possible, sauf quand le mode *Générateur* se fait nécessaire.

La limite du mode *ZEV* reste avec la limite de puissance que la batterie apporte, ce qu'on va limiter à 10kW électrique. Donc, même si le mode *Range Extender* apporte un meilleur gain pour des petites puissances, le mode *ZEV* sera la priorité.

4.2.1.4 Freinage Récupératif

L'énergie créée par le freinage du véhicule est toujours stockée dans la batterie et réutilisée en mode *ZEV*. Il est donc intéressant de estimer la quantité total d'énergie absorbé à travers du freinage pour pouvoir réfléchir sur sa meilleur application en mode *ZEV*.

A titre d'information, une comparaison a aussi été réalisée sur l'intérêt de réaliser la récupération d'énergie avec la machine MH1, lié à l'embrayage du véhicule, ou avec la machine MH3, liée directement aux roues.

Les Figure 4.9 et Figure 4.10 explicitent les puissances délivrées au moment du freinage et l'énergie générée dans ces moments.

Les courbes clarifient le fait que c'est beaucoup plus rentable la récupération de l'énergie directement aux roues, et pour cela le positionnement d'une machine électrique dans l'essieu arrière est la meilleure option, vu qu'il y a beaucoup moins de frottement et donc moins de pertes.

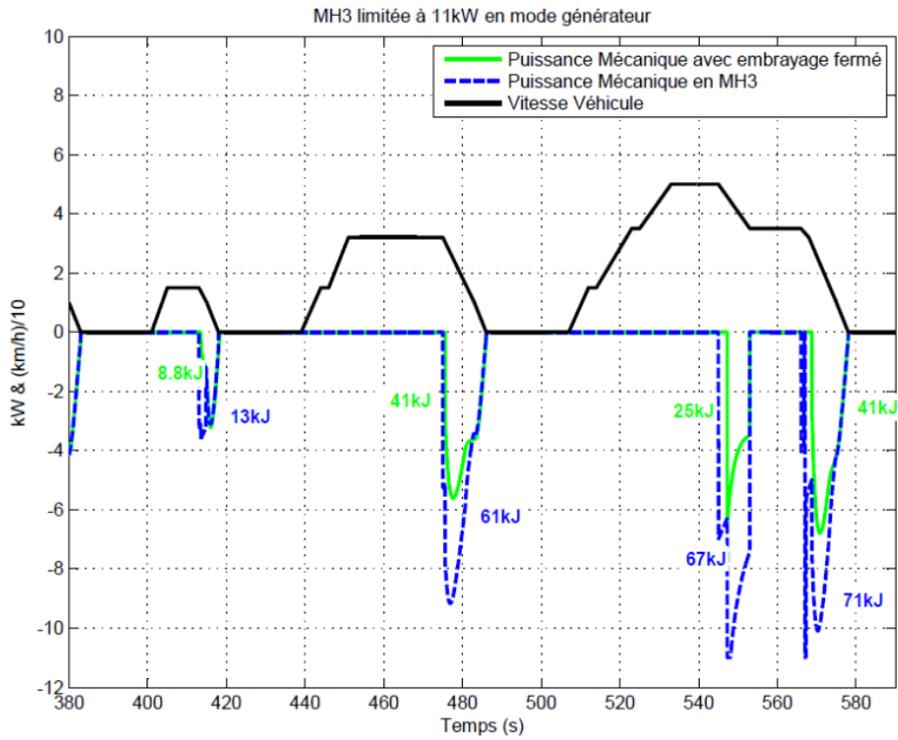


Figure 4.9 - Freinage récupératif - Phase urbaine

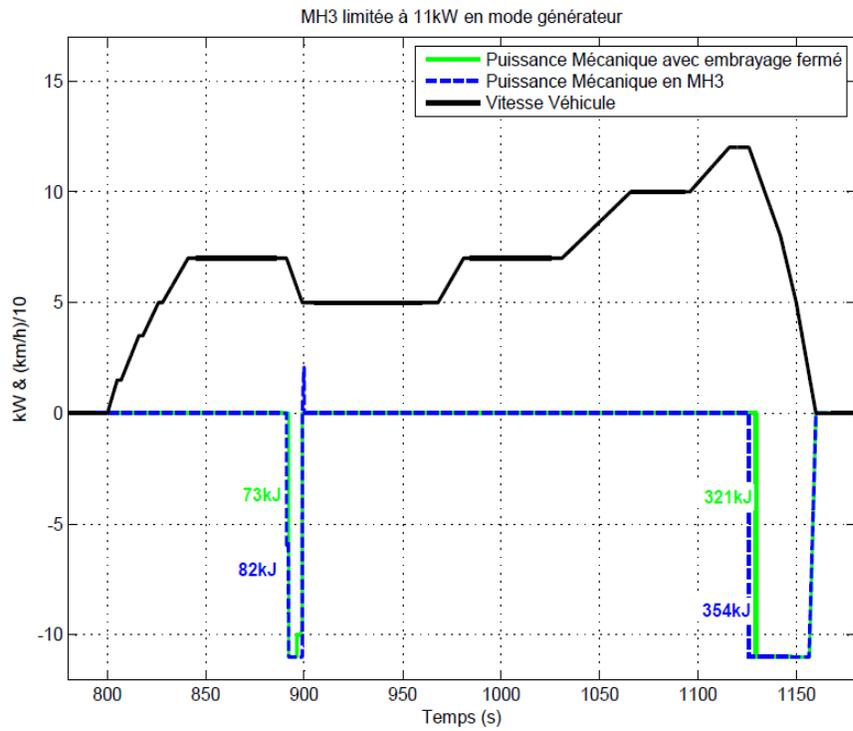


Figure 4.10 - Freinage récupératif - Phase extra-urbaine

Au total, l'énergie récupérée à travers une machine MH1 c'est 809kJ, contre 1283kJ en MH3, soit un gain de 58% en récupération d'énergie.

Pour pouvoir quantifier cette énergie récupérée en gain apporté au véhicule, deux hypothèses ont été considérés. On peut utiliser cette énergie pour réaliser deux fonctions qui serions, à priori, réalisés par le moteur thermique : du boost, et d'alimentation pour des consommateurs électriques, c'est-à-dire, le réseau 13V du véhicule. On calcule donc combien de grammes de CO_2 le moteur thermique dépensera pour fabriquer la même quantité d'énergie qu'on récupère en freinage. Le Tableau 4.6 montre le gain apporté pour chaque utilisation.

- Consommateurs électriques :

$$\text{Carburant (l)} = \frac{\text{Energie}}{\eta * P_{cal} * \rho_{carb}} = \frac{\text{Energie}}{0.9 * 42.5 * 10^6 * 0.75}$$

$$g CO_2 = \frac{\text{Carburant} * 1000 * \text{conversion } g CO_2}{\eta_{Mth} * \Delta S_{cycle} * 7,5} = \frac{\text{Carburant} * 1000 * 23.5}{0.36 * 11 * 7.5}$$

- Boost :

$$\text{Carburant (l)} = \frac{\text{Energie} * \eta}{P_{cal} * \rho_{carb}} = \frac{\text{Energie} * 0.9}{42.5 * 10^6 * 0.75}$$

$$g CO_2 = \frac{\text{Carburant} * 1000 * \text{conversion } g CO_2}{\eta_{Mth} * \Delta S_{cycle} * 7,5} = \frac{\text{Carburant} * 1000 * 23.5}{0.36 * 11 * 7.5}$$

Tableau 4.6 - Gain en freinage

Consommateurs Electriques	Boost
24 g/km de CO_2	20 g/km de CO_2

4.2.2. Simulations

Il faut tenir compte de quelques informations par rapport à la simulation :

- La fonction *Regen* est utilisée pour récupérer de l'énergie du freinage tant que le stockeur ne soit pas rempli (>70%) ;

- Fonction ZEV est interdite pour des vitesses >70 km/h, et dans notre cas, on va la limiter à 10kW électrique ;
- Fonction ZEV est illimitée : quand le stockeur d'énergie est vide, la machine MH1 est activée pour le mode *Générateur* ;
- La simulation doit commencer et finir avec le même état de charge du stockeur (Iso-SOC) ;
- Tout besoin de puissance >16 kW ne passe plus par la chaîne électrique et donc fonctionne comme dans un véhicule classique.

Les simulations ont été réalisées à travers le modèle de simulation présentée dans la figure

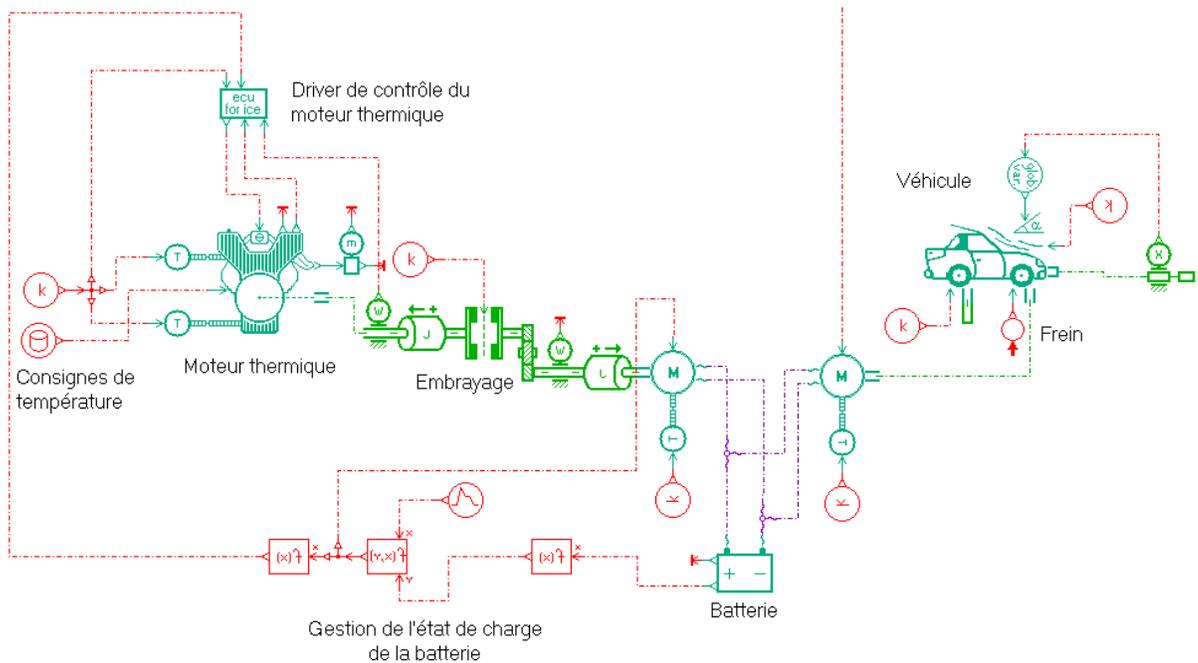


Figure 4.11 - Schéma de simulation

Des différentes simulations ont été réalisées pour le cycle NEDC. Le Tableau 4.7 comparatif montre les résultats obtenus.

Tableau 4.7 - Comparaison des stratégies

Fonctionnement limitée à 16kW					
(toutes les accélérations de 10kW à 16kW sont réalisées avec le mode REX, et ajoutent un gain de 6,12g/km de CO ₂)					
Stratégie	Energie	Energie restant utilisée en:			
		Boost		Cons. Elec.	
Regen + Batt Acc <10kW	509kJ utilisés (acc.) 656kJ restant (boost ou conso. Elec)	27 g/km de CO₂	(10,63g/km gain batt + 10,64g/km boost)	28 g/km de CO₂	(10,63g/km gain batt + 11,08g/km conso. Elec.)
Regen + Batt Plat	721kJ utilisés (pla- teaux) 444kJ restant (boost ou conso. Elec)	40 g/km de CO₂	(26,95g/km gain batt + 7,44g/km boost)	42 g/km de CO₂	(26,95g/km gain batt + 9,19g/km cons. elec)
Regen + Batt Acc <10kW + REX Plat	509kJ utilisés (acc.) 656kJ restant (boost ou conso. Elec)	42 g/km de CO₂	(10,63g/km gain batt + 14,95g/km REX + 10,64g/km boost)	43 g/km de CO₂	(10,63g/km gain batt + 14,95g/km REX + 11,08g/km conso. Elec.)
Regen + Batt Plat + REX acc<10kW	721kJ utilisés (pla- teaux) 444kJ restant (boost ou conso. Elec)	43 g/km de CO₂	(26,95g/km gain batt + 2,82g/km REX + 7,44g/km boost)	45 g/km de CO₂	(26,95g/km gain batt + 2,82g/km REX + 9,19g/km conso. Elec.)
Regen + REX Acc <10kW + REX Plateaux	1165kJ utilisés (boost ou conso elec)	43 g/km de CO₂	(14,95g/km plat + 2,82g/km acc<10 + 19,53g/km boost)	48 g/km de CO₂	(14,95g/km plat + 2,82g/km acc<10 + 24,11g/km conso. Elec.)
Regen + Batt Acc <10kW + Batt Plateaux	1153kJ utilisés (pla- teaux+acc<10) 12kJ restant (boost ou conso. Elec)	44 g/km de CO₂	(37,58g/km gain batt + 0,19g/km boost)	44 g/km de CO₂	(37,58g/km gain batt + 0,25g/km conso. Elec.)

La troisième et la quatrième stratégies présentées au tableau précédent seront analysées plus minutieusement à travers de ces courbes.

On appellera stratégie 1 le fonctionnement du système avec le mode ZEV pour les vitesses constantes et le mode REX pour les accélérations $<10\text{kW}$, et accélérations $>10\text{kW}$ et $<15\text{kW}$. Les courbes se trouvent dans les figures Figure 4.12 et Figure 4.13.

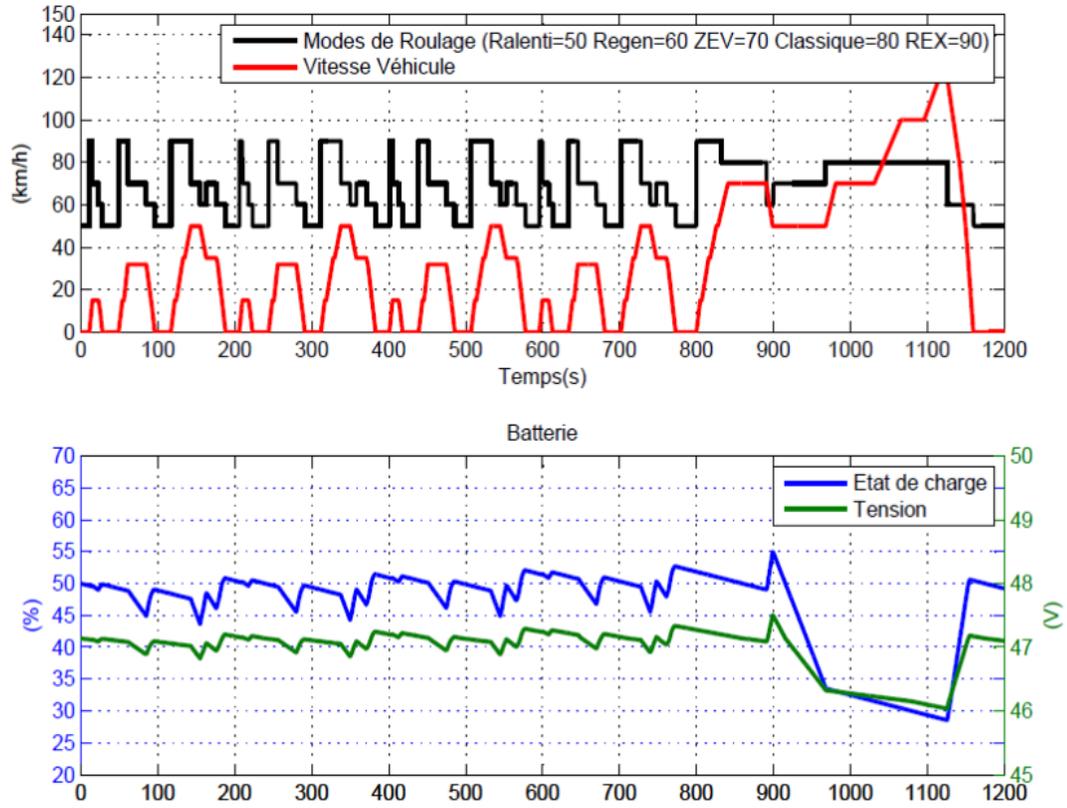


Figure 4.12 - Stratégie 1 : Mode et état de la batterie

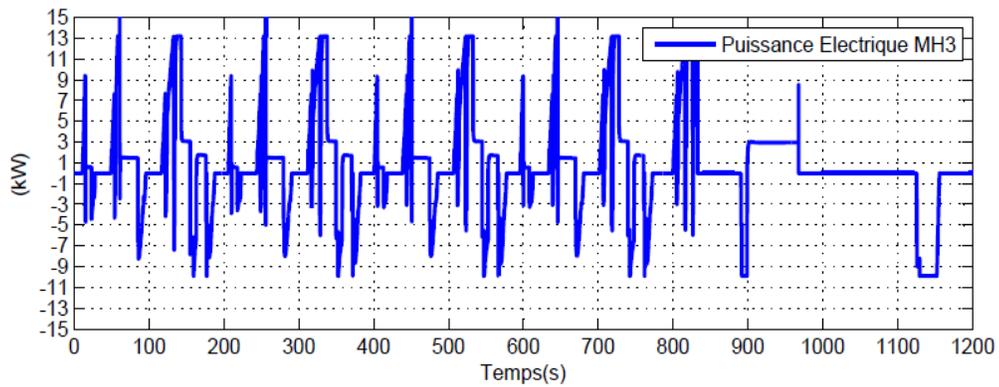
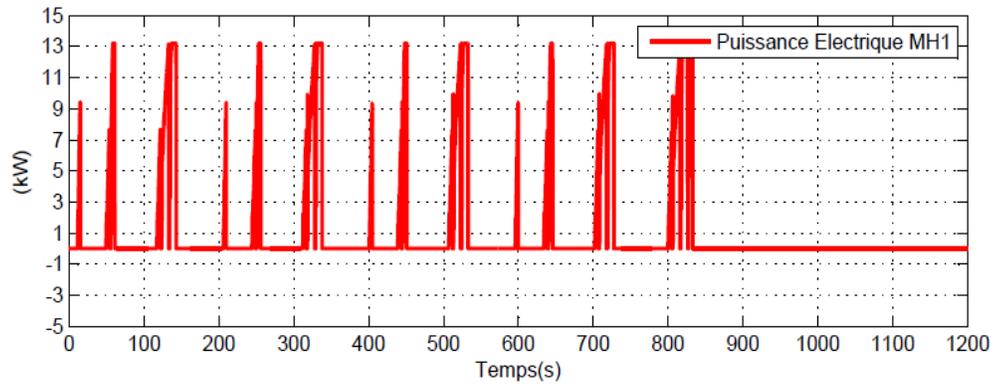


Figure 4.13 - Stratégie 1 : Puissances électriques MH1 et MH3

Les courbes de la stratégie 2, soit le fonctionnement du système avec le mode *ZEV* pour les accélérations $<10\text{kW}$ et le mode *REX* pour les vitesses constantes et accélérations $>10\text{kW}$ et $<15\text{kW}$, sont montrés dans les figures Figure 4.14 et Figure 4.15.

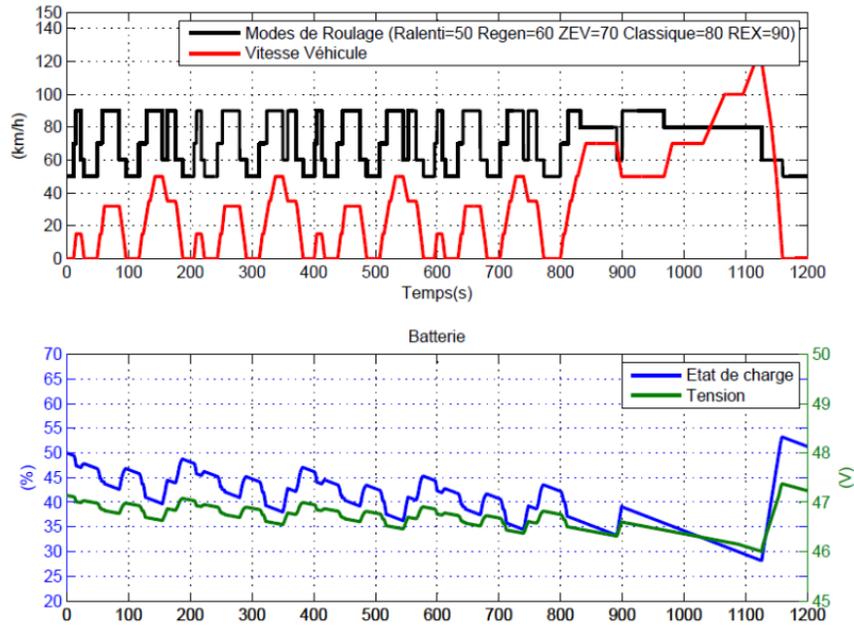


Figure 4.14 -Stratégie 2 : Mode et état de la batterie

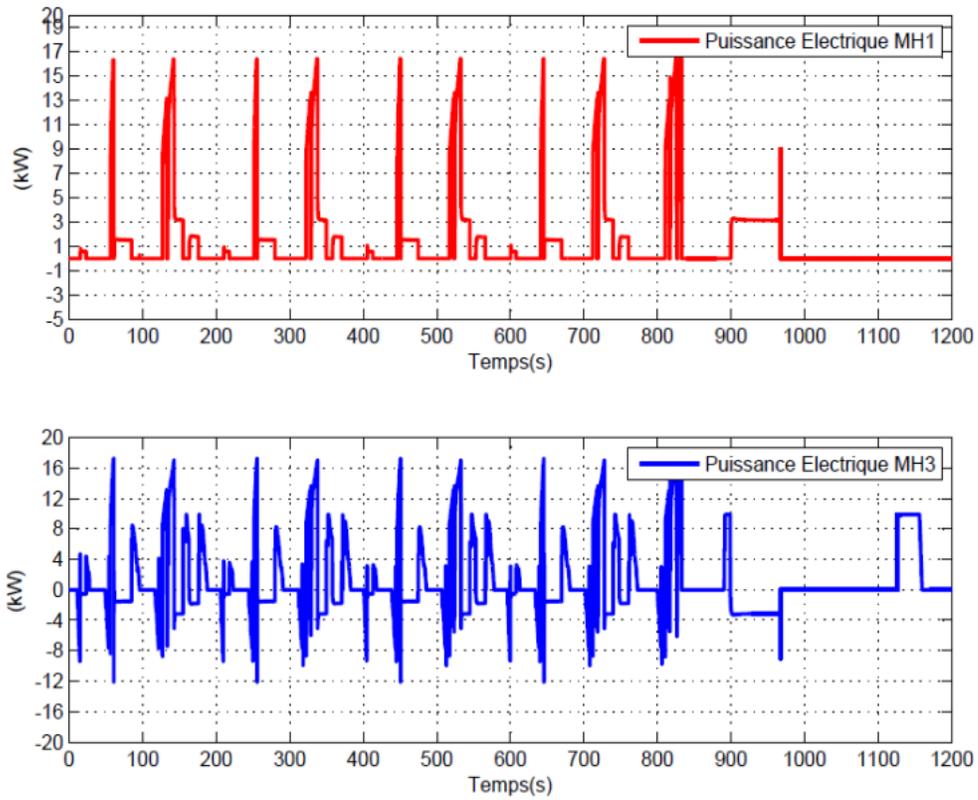


Figure 4.15 - Stratégie 2 : Puissances électriques MH1 et MH3

L'analyse du mode REX toute seule nous montre aussi des résultats intéressants dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 - Gain d'émission du mode REX

Stratégie	Gain d'émission dans le cycle NEDC
Mode REX limité à 10 kW (48V fixe)	18 g/km de CO ₂
Mode REX limité à 16 kW (tension variable 48V – 90V)	24 g/km de CO ₂

Il faut tenir compte que pour cette simulation, dans la limite de puissance permis, tout le cycle NEDC à été réalisé avec le mode REX et, au-delà de la limite de puissance, c'est le moteur thermique seule qui tracte le véhicule. Aucun autre mode n'a été pris en compte dans cette simulation.

4.3 Conclusion de l'étude énergétique

A travers l'étude énergétique réalisée, nous avons pu constater que le mode Range Extender apporte des gains d'émissions bien significatifs au véhicule proposé. La gestion du point de fonctionnement du moteur thermique à travers une machine électrique s'est montré une stratégie intéressante, par contre il faut tenir compte que le rendement des machines électriques a été maintenu constant et égal à 90%, c'est que n'est pas toujours le cas.

Pour la suite de ce rapport, il faut tenir compte des problèmes d'automatiques et système posés à propos de la déconnexion de la batterie, ainsi comme la variation de la tension de bus, pour pouvoir arriver à une tension de 16 kW dans la machine électrique MH3. Pour assurer le bon passage des modes, ainsi comme la sécurité des composants électriques, un étude automatique sera mis en place à l'aide du logiciel PSIM.

5 ETUDE DES LOIS DE CONTRÔLE

Cette étude sera réalisée pour le contrôle de tout l'ensemble de l'architecture. Le passage d'un mode à l'autre exige une régulation spéciale par rapport au niveau de tension et courant dans la partie électrique qui lie les deux machines. Le fait d'ajouter un interrupteur pour la batterie implique dans le besoin de prendre soin des quelques mesures pour la sécurité du stockeur.

En prenant compte de tout ces facteurs, il reste définir comment nous allons procéder pour réaliser toutes ces régulations. Quels composants nous avons besoin de mettre entre les deux machines pour pouvoir assurer que la variation de tension soit faisable, contrôlable et suffisamment rapide pour pouvoir passer d'un mode à l'autre sans que le conducteur puisse sentir.

La suite de cette étude alors réside, d'abord, sur le choix du type de machine plus adapté pour répondre à nos besoins. Ensuite, la régulation de chaque machine ce fait nécessaire pour qui une puisse réguler la tension et l'autre le fonctionnement du véhicule. On fini pour résoudre le problème du transfert de puissance dans la partie électrique à travers les composants à être définis et la gestion de cela à travers les régulateurs.

5.1 Machines Electriques Empruntées

Jusqu'à ce moment, les simulations ont été réalisées avec un modèle simple de machine électrique, à l'aide du logiciel Amesim. Par contre, à partir de ce moment, il va nous falloir réaliser le contrôle réel de la machine, et pour cela il nous faut connaître le type de machine que sera implémenté.

Pour le choix des machines, une réunion a été réalisée avec des spécialistes en machine de Valeo. Après discussion, nous avons décidé que la meilleure option serai prendre pour les deux machines, soit la MH1 et la MH3, des Machines Synchrones à Double Excitation.

L'ajout d'une excitation bobinée nous permet un degré de liberté supplémentaire, ce que nous permet d'optimiser le rendement du moteur dans la zone couple-vitesse plus sollici-

tée. La Figure 5.1 montre la courbe couple-vitesse du fonctionnement des deux machines extrait du logiciel Amesim pendant tout le cycle NEDC.

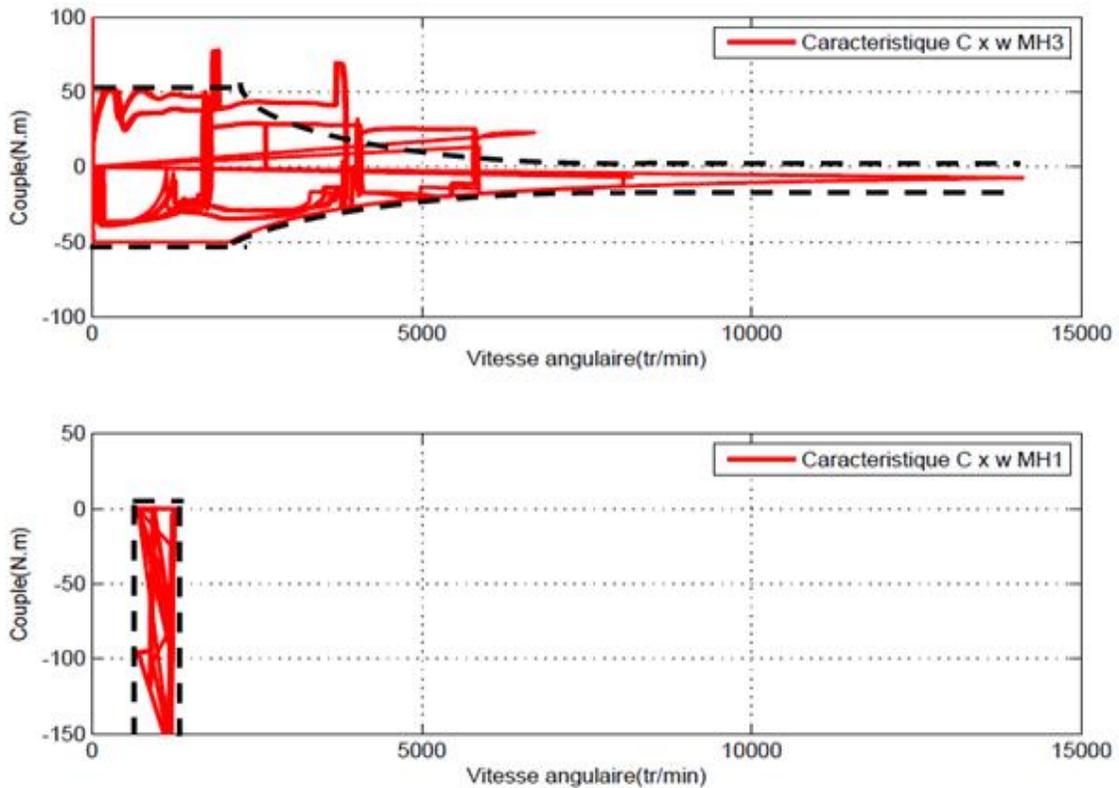


Figure 5.1 - Diagramme couple-vitesse des machines

Dans le cas de la MH3, on aura besoin de la faire fonctionner à haute vitesse pendant une bonne partie de temps, vu qu'elle entraîne l'essieu arrière. Il faut donc tenir compte d'une contrainte apporté par les machines à aimants permanents. La présence des aimants imposent un problème de tenue en température. Il est nécessaire de faire un compromis entre la vitesse maximale de fonctionnement et le facteur de puissance. Pour n'avoir pas de problème pour arriver à haute vitesse avec la MH3, l'ajout d'une excitation se fait nécessaire, vu qu'on peut contrôler le flux inducteur et donc améliorer le fonctionnement sur une large plage de vitesse, tout en ne sacrifiant pas le facteur de puissance.[11]

Pour la machine MH1, nous avons d'abord réfléchi sur la possibilité d'utiliser une machine à griffes, comme la plupart des alternateurs utilisés chez Valeo. Par contre, la grande contrainte de la machine à griffes c'est son mauvais rendement. La MH1, entraînée par le mo-

teur thermique, aura presque tout le temps une basse vitesse, mais elle doit pouvoir délivrer des fortes puissances en régime transitoire, comme montré dans la figure précédente. La machine à double excitation est meilleur adaptée pour fournir de la puissance en régime transitoire.

5.2 Régulation et contrôle des machines

5.2.1. Modélisation de la machine synchrone à double excitation

Une machine synchrone à double excitation est une machine avec deux sources différentes de création du flux d'excitation, un flux crée par des aimants et l'autre par des bobines d'excitation. [11]

On écrit alors les équations régissant le fonctionnement de la machine :

$$\omega_s = L_s \cdot i_s + L_{sr} \cdot i_f$$

$$\omega_f = L_{sr}^t \cdot i_s + L_f \cdot i_f$$

$$V_s = R_s \cdot i_s + \frac{d\phi_s}{dt}$$

$$V_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\phi_f}{dt}$$

Avec :

$$V_s = \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

En appliquant la transformé de Park :

$$\begin{pmatrix} X_d \\ X_q \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{pmatrix}$$

Nous avons les équations suivantes dans le repère diphasé :

Tensions :

$$V_d = R_s \cdot i_d - p \cdot \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} + M_f \cdot \frac{di_f}{dt}$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + p \cdot \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f) + L_q \cdot \frac{di_q}{dt}$$

$$V_f = R_f \cdot i_f + M_f \cdot \frac{di_d}{dt} + L_f \cdot \frac{di_f}{dt}$$

Flux :

$$\phi_d = L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f$$

$$\phi_q = L_q \cdot i_q$$

$$\phi_f = L_f \cdot i_f + M_f i_d$$

Couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \cdot ((L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + M_f \cdot i_f \cdot i_q)$$

A partir des équations précédentes, nous pouvons réaliser la régulation des deux machines à travers les fonctions de transfert du système. Nous allons analyser la régulation de chaque machine séparément pour la suite.

5.2.2. Le modèle linéaire de la MSDE

Le modèle de la machine à être implémenté sous PSIM est un modèle linéaire, qui ne tient pas compte des saturations ni d'autres possibles comportements non linéaires de la machine. Dans la Figure 5.2, nous pouvons voir comment ce modèle linéaire a été mis en place.

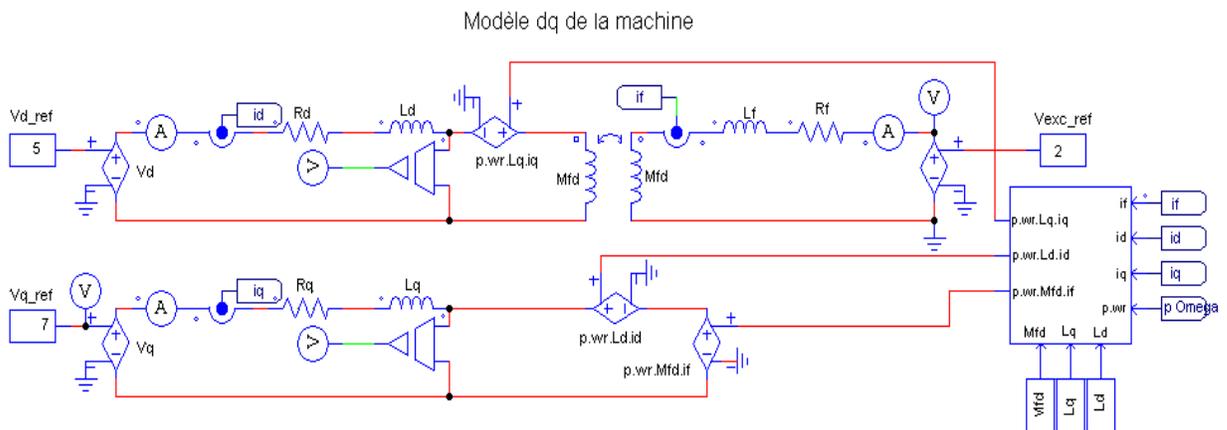


Figure 5.2 - Modèle linéaire MSDE

5.2.3. Machine MH3

La machine MH3 est celle qui entraîne les roues arrières et donc fait rouler le véhicule. Pour cela, c'est évident qu'elle doit être contrôlée en couple, pour qu'on puisse contrôler le mouvement de la voiture.

On commence alors par les régulations des courants des axes d et q et aussi du circuit d'excitation, ici appelé comme axe f.

L'onduleur étant un onduleur de tension, il nous faut définir les fonctions de transfert appliquées entre V_d, V_q, I_d, I_q . Les équations de tension de la machine sont montrés à la fin du §4.2.1. Dans ces équations on voit que les tensions et courants des axes sont couplés, et donc un découplage ce fait nécessaire pour qu'on puisse trouver la fonction de transfert de chaque axe séparément. Pour cela, nous allons isoler les termes que ne font pas partie du même axe et l'appeler Fem.

$$\begin{aligned}
 V_d &= V'_d + Fem_d \\
 V_q &= V'_q + Fem_q \\
 V'_d &= R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} \\
 V'_q &= R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} \\
 Fem_d &= -\omega_r \cdot L_q \cdot I_q + M_{fd} \cdot \frac{dI_f}{dt} \\
 Fem_q &= \omega_r \cdot L_d \cdot I_d + M_{fd} \cdot I_f
 \end{aligned}$$

Nous avons donc les fonctions de transfert suivantes :

$$\begin{aligned}
 \frac{I_d(p)}{V'_d(p)} &= \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_d}{R_s} \cdot p} \\
 \frac{I_q(p)}{V'_q(p)} &= \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_q}{R_s} \cdot p}
 \end{aligned}$$

Pour le circuit d'excitation, à partir des équations de la tension et du flux au rotor, nous avons les équations suivantes, qui on doit découpler de l'axe d, celui-ci étant, par convention, colinéaire avec le rotor.

$$I_f(p) = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p} \cdot V_f(p) - \frac{M_{fd}}{R_f} \cdot \frac{p}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p} \cdot I_d(p)$$

$$I_f(p) = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p} \cdot (V_f'(p) + M_{fd} \cdot p \cdot I_d(p)) - \frac{\frac{M_{fd}}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p} \cdot I_d(p)$$

$$\frac{I_f(p)}{V_f(p)} = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p}$$

Le schéma nous permettant de calculer le régulateur de l'inducteur se résume à la Figure 5.4.

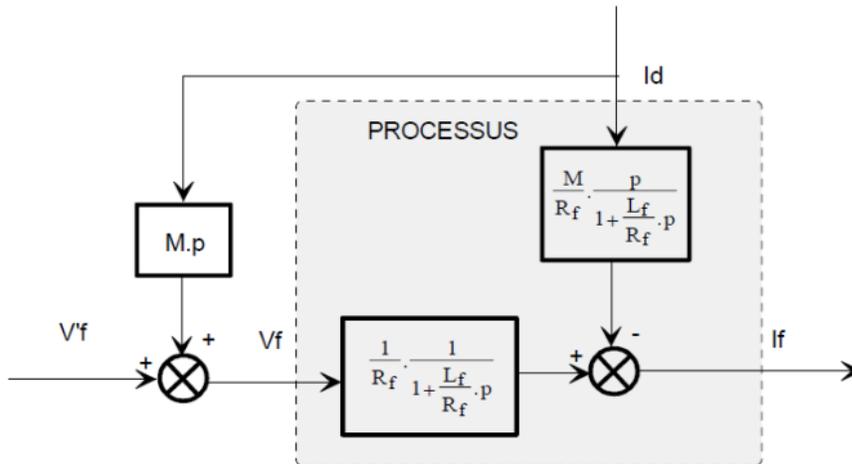


Figure 5.4 - Schéma de compensation du courant d'excitation

Nous allons poursuivre avec l'utilisation des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI). Les calculs des constants des régulateurs ont été calculée à l'aide du logiciel Simulink, avec analyse des diagrammes de Bode. Pour un $\xi = 0.7$, quand le gain est égal à -3dB dans le

diagramme, la phase doit être à -45° . Voici dans les figures Figure 5.5, Figure 5.6 et Figure 5.7 les diagrammes pour les valeurs retenues de K_p et K_i de chaque régulateur.

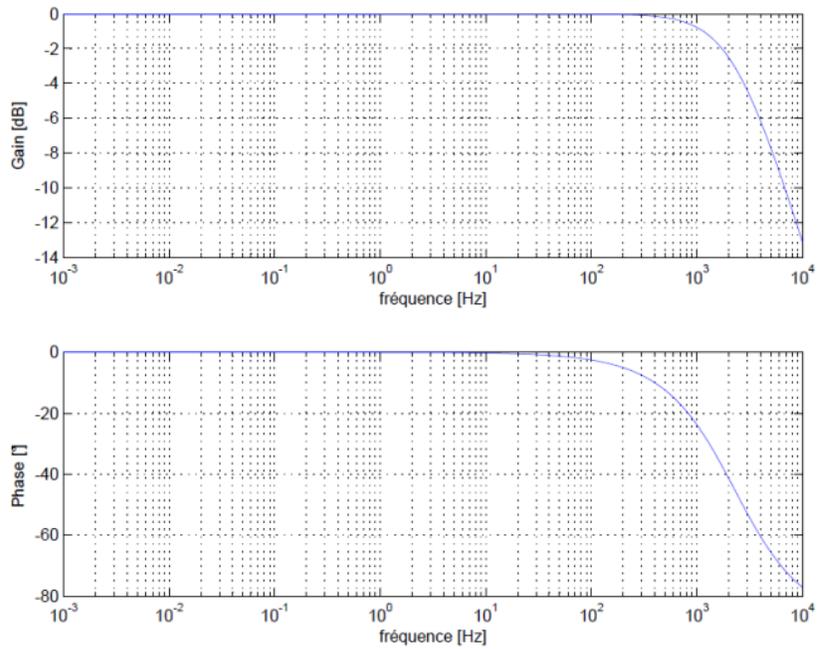


Figure 5.5 - Diagramme de Bode - Axe d

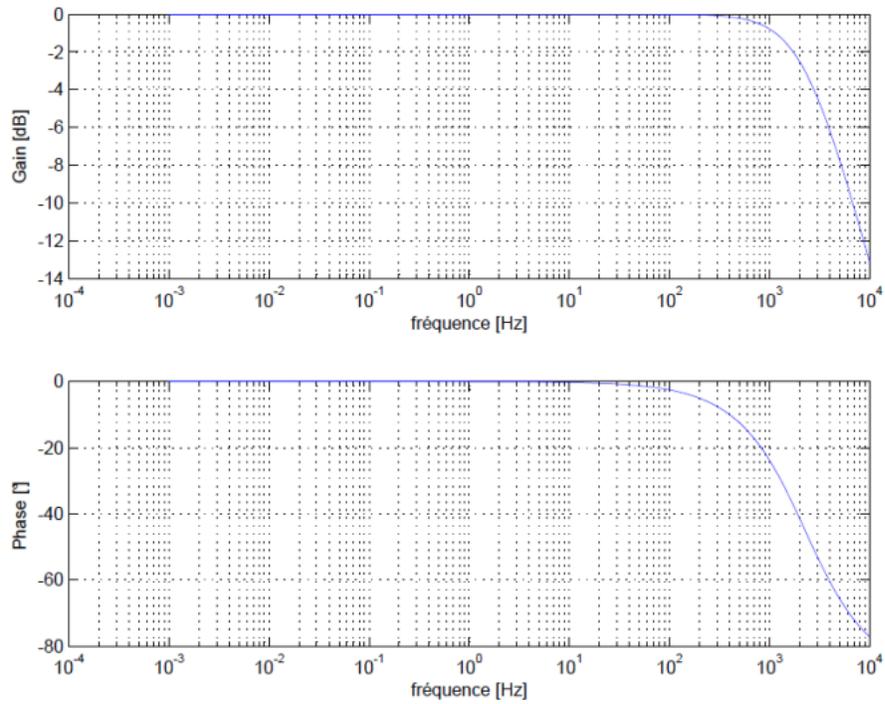


Figure 5.6 - Diagramme de Bode - Axe q

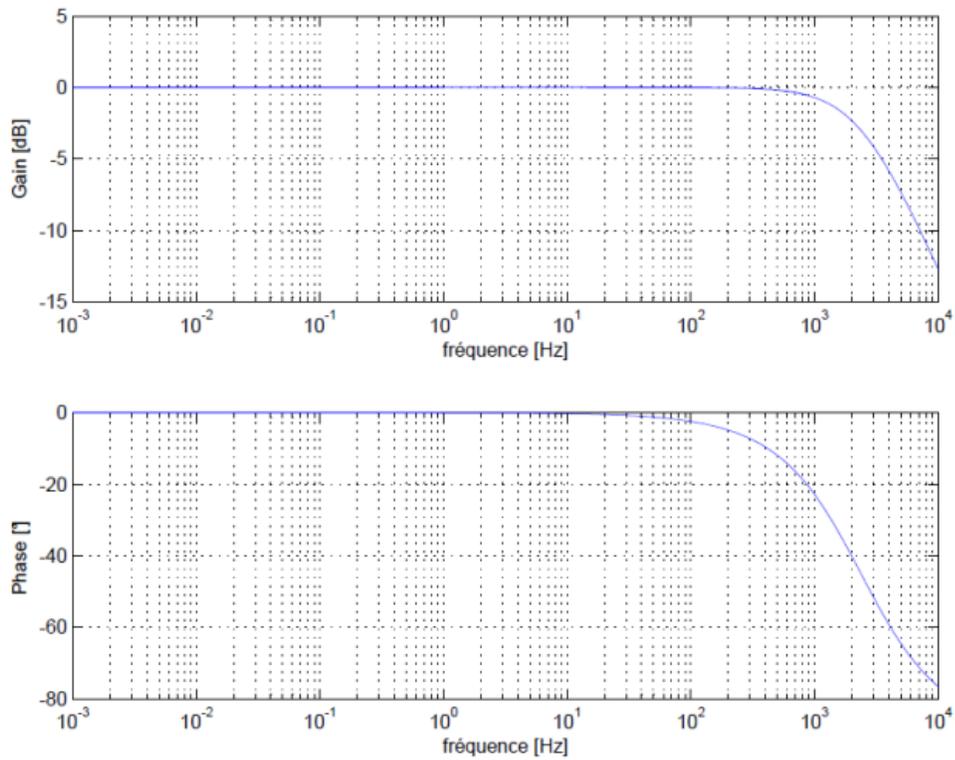


Figure 5.7 - Diagramme de Bode - Circuit d'excitation

Les valeurs des constantes des régulateurs sont les suivants :

Axe d
$K_p = 49,23$
$K_i = 500$

Axe q
$K_p = 49,23$
$K_i = 500$

Circuit d'excitation
$K_p = 1695$
$K_i = 500$

La validation de ces régulations est évidente dans les courbes des figures 5.8, 5.9, 5.10 et 5.11:

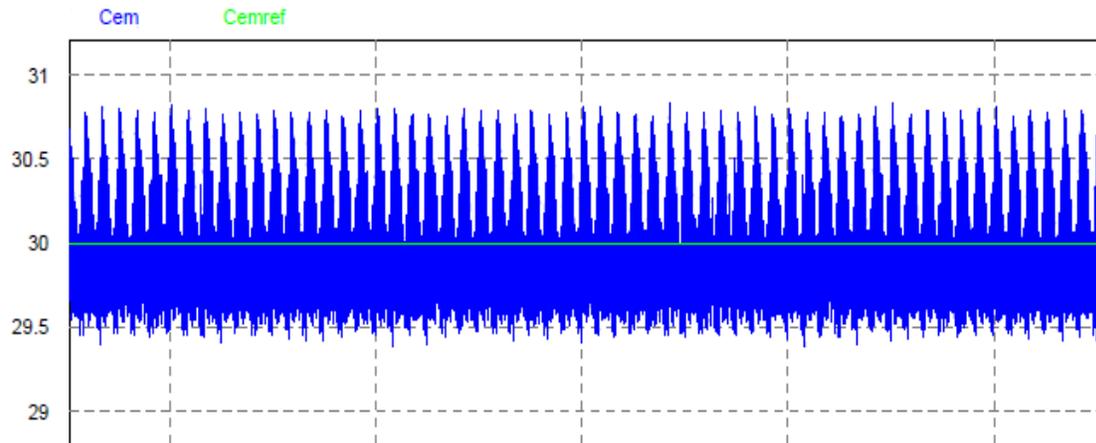


Figure 5.8 - Régulation du couple

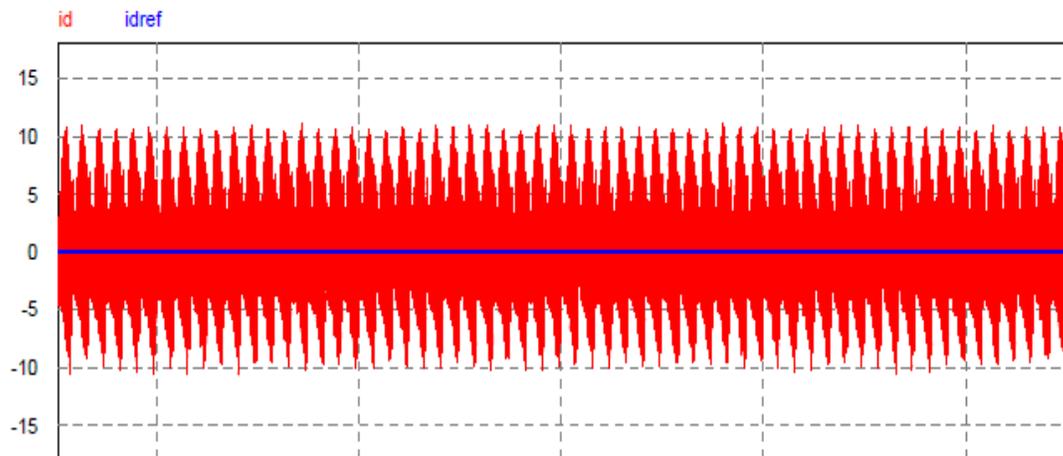


Figure 5.9 - Régulation du courant I_d

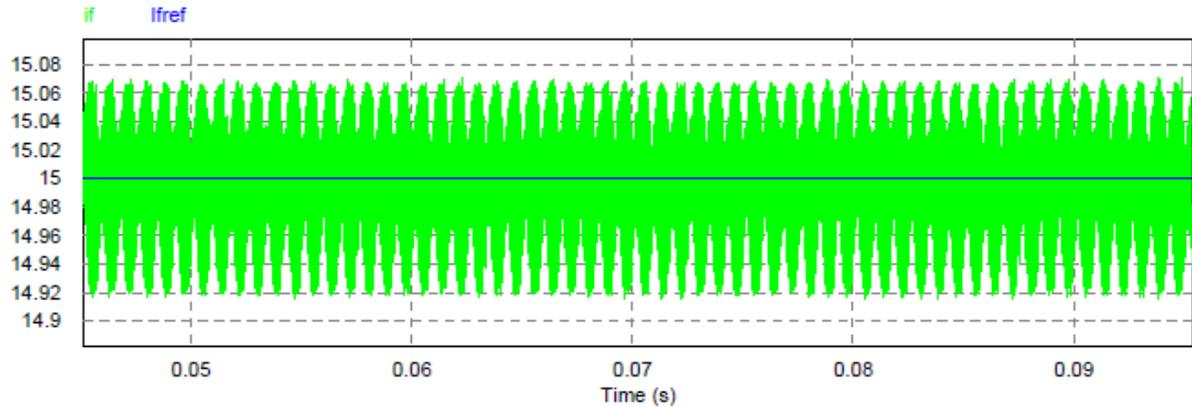


Figure 5.10 - Régulation du courant d'excitation

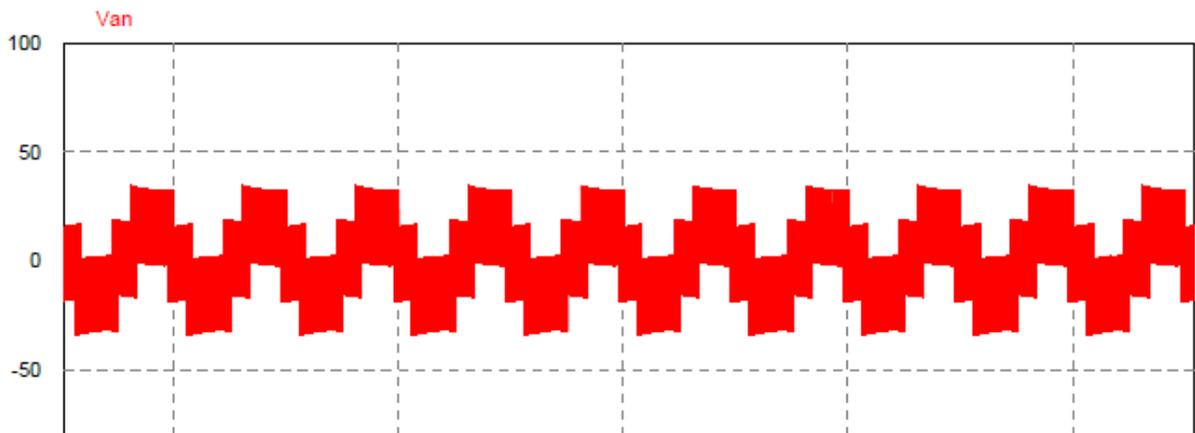


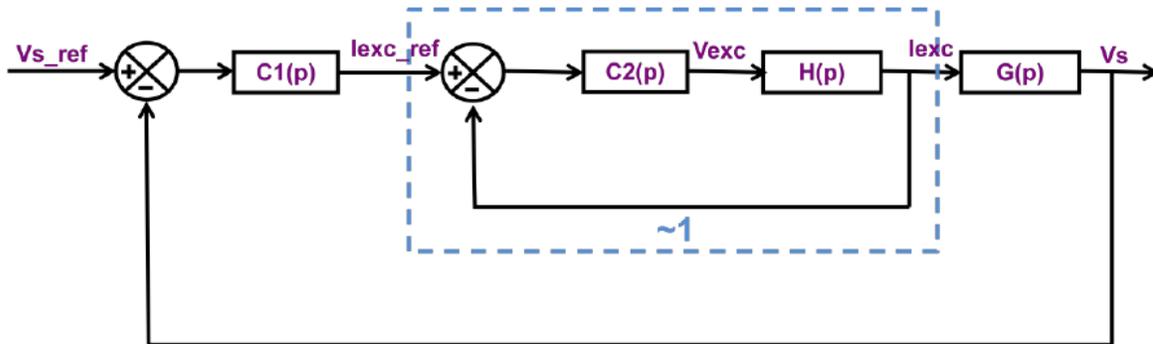
Figure 5.11 - Tensions alterné Van

5.2.4. Machine MH1

La machine qui est en face avant travaillera plutôt comme générateur. Elle enlève l'énergie mécanique envoyée par le moteur thermique, étant entraîné par lui, et la transforme en énergie électrique. Vu que nous avons souvent besoin de varier la valeur de la tension dans la chaîne électrique, c'est cette machine que sera chargé de réaliser le contrôle de la tension en sortie du convertisseur.

L'existence de l'excitation à rotor bobiné nous permet un degré de liberté pour contrôler la tension de sortie à travers le courant du circuit continu d'excitation. Nous pouvons, alors, générer la référence du courant d'excitation à partir de la régulation de la tension.

Il faut tenir compte que nous avons une boucle dans une boucle. Pour cela, il nous faut bien assurer que la boucle interne du courant d'excitation soit beaucoup plus rapide que la boucle extérieure de tension.



Dans la figure les régulations des deux boucles sont exposées. Les correcteurs sont représentés par les blocs $C1(p)$ et $C2(p)$ et les blocs $H(p)$ et $G(p)$ représentent les fonctions de transferts entre les tensions et les courants respectives. La boucle interne de courant peut être considérée égale à 1 par rapport à la boucle de tension si on la fait avec une réponse rapide. Pour la constante de temps de la tension, nous avons choisi une valeur dix fois plus grande que celle de la boucle de courant. Les valeurs retenues sont alors les suivantes :

$$K_p = 6 \quad K_i = 50$$

Le contrôle des autres deux courants, pour l'axes d et q, ont été réalisés de la même façon de la machine MH3 avec les mêmes valeurs appliquées aux correcteurs.

En sortie du redresseur, une capacitance en série avec une résistance a été ajoutée pour que l'énergie du générateur soit délivré, comme montré dans la figure 5.12.

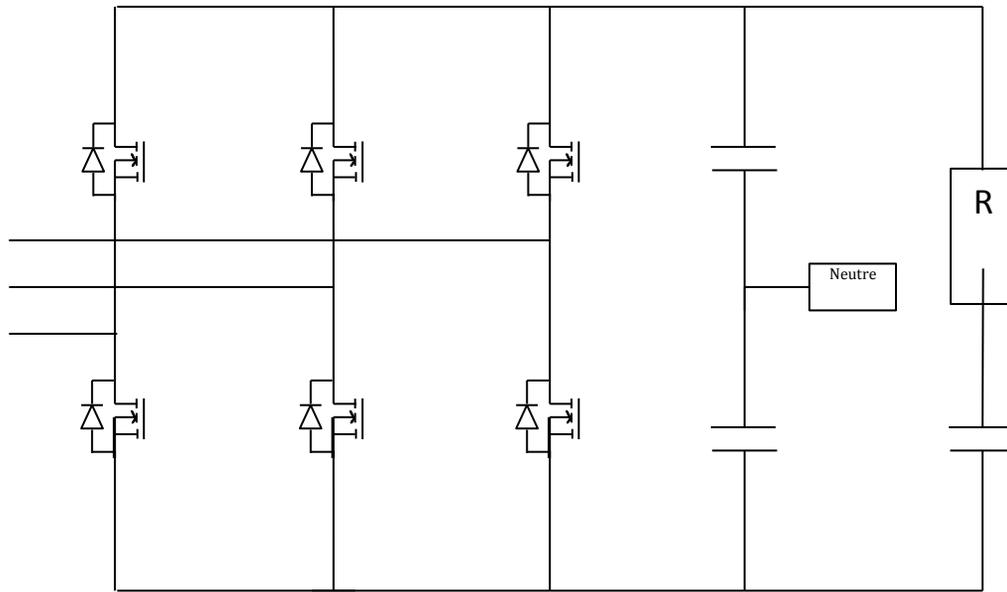


Figure 5.12 - Schéma en sortie du convertisseur

$$R = 20m\Omega$$

$$C = 50mF$$

Voici ensuite dans les figures 5.13, 5.14, 5.15 et 5.16 la validation de la régulation de tension. On voit à travers le courant triphasé que le changement du niveau de tension ne résulte en aucun impacte pour le courant triphasé. Le courant d'excitation s'adapte pour réaliser le contrôle de la tension.

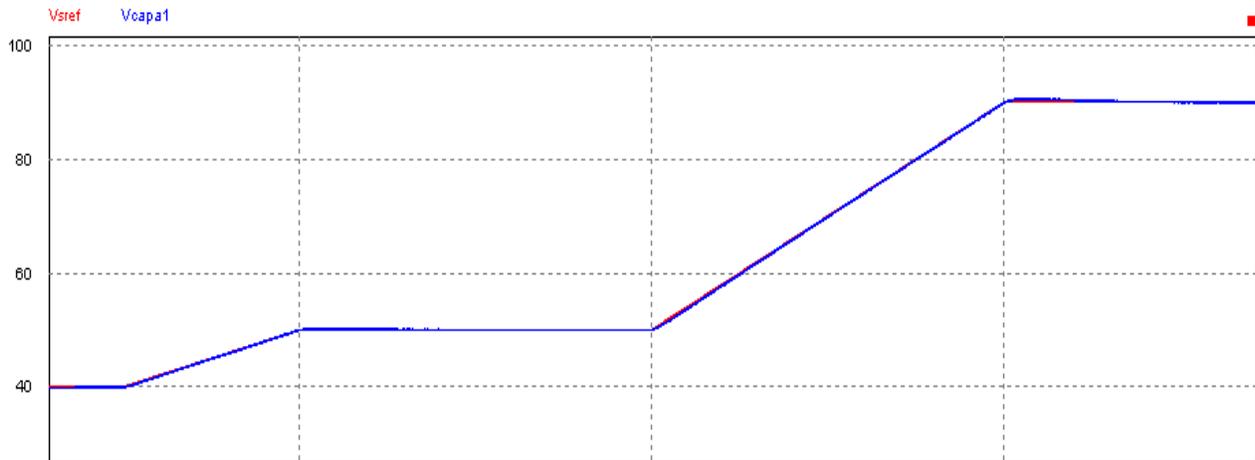


Figure 5.13 - Régulation de la tension de bus DC

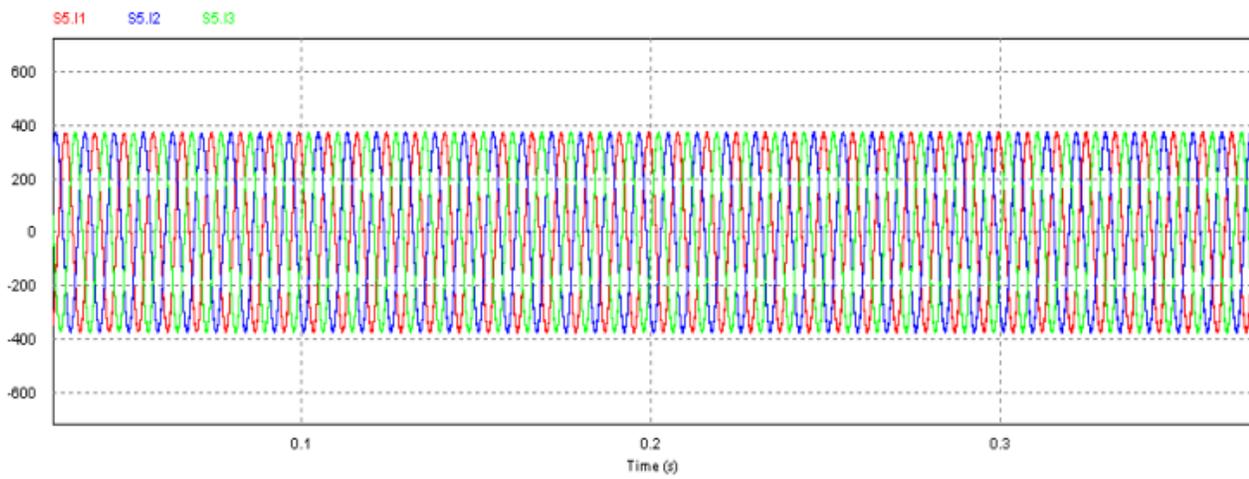


Figure 5.14 - Courant triphasé

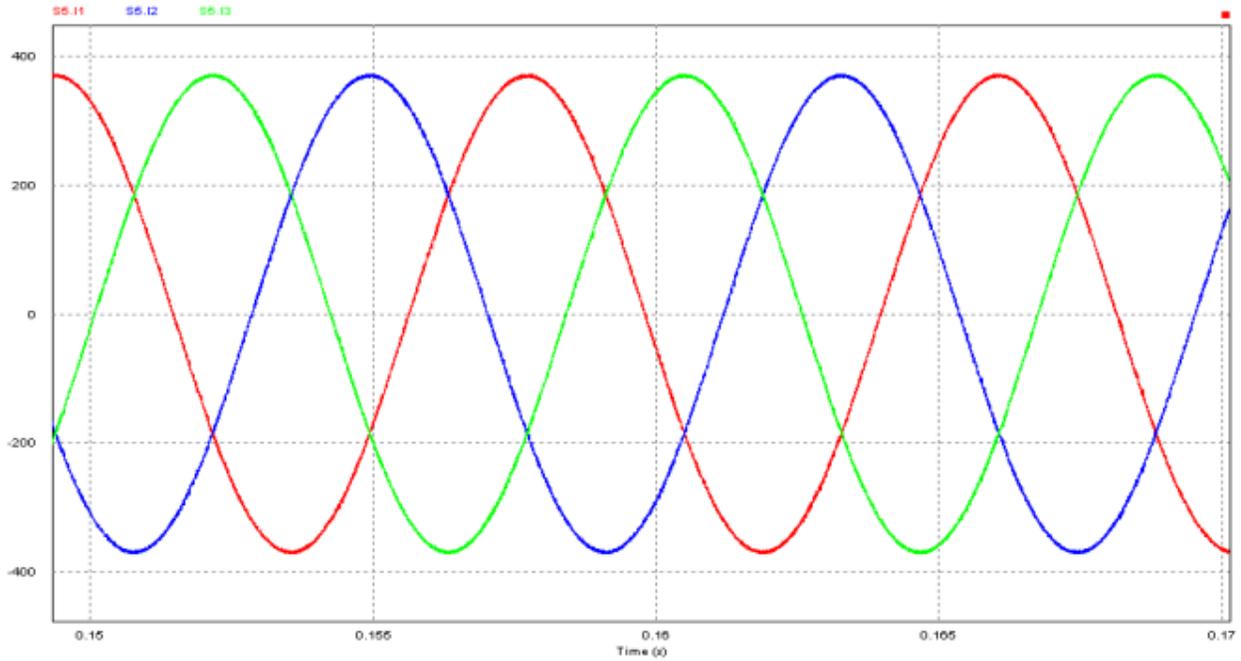


Figure 5.15 - Zoom du courant triphasé

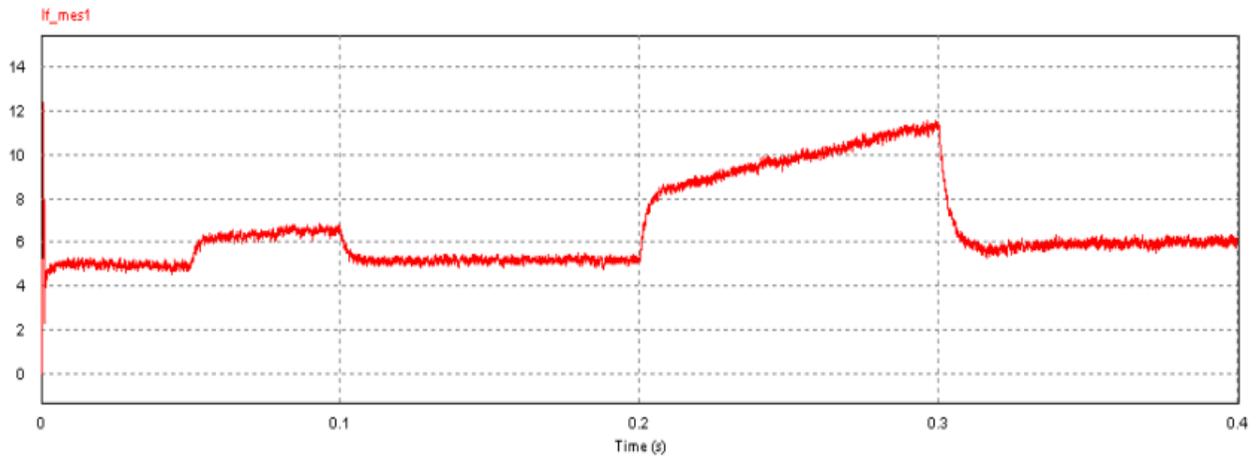


Figure 5.16 - Régulation du courant d'excitation

Il y a encore une deuxième façon de réaliser le contrôle de la tension, soit à travers le courant I_q . De cette forme, on ne serait pas attaché à la machine à double excitation, et on pourrait envisager une machine à aimants permanents pour l'avenir.

5.3 Adaptation du réseau continu

Après avoir régulé les deux machines séparément, l'objectif maintenant c'est de réaliser la liaison entre les deux, les faisant fonctionner en accord, en assurant les changements des modes en toute sécurité.

La batterie ayant un interrupteur pour la connecter et déconnecter quand nécessaire, une constante surveillance du niveau de tension et courant doit être assurée. Il faut tenir compte que pour fermer cet interrupteur, le niveau de tension doit être ramené à 48V environ, et il ne peut pas avoir de passage de courant dans ce moment.

La question était donc : qu'est-ce qu'on doit mettre dans le réseau continue pour pouvoir réaliser les fonctions dont on a besoin ? Est-ce qu'une seule capacitance est suffisante, ou il fallait en mettre deux ? Est-ce que nous avons besoin d'autres interrupteurs ou le seule de la batterie est suffisant ?

Pour répondre à ces questions, un *brainstorming* a été organisé avec des spécialistes en machine, électronique de puissance et automatique.

Finalement, nous nous sommes décidés pour le schéma suivant (figure Figure 5.17), avec une seule capacitance pour réguler la tension et un interrupteur. Un circuit *snubber* a été également ajouté pour la protection de la batterie.

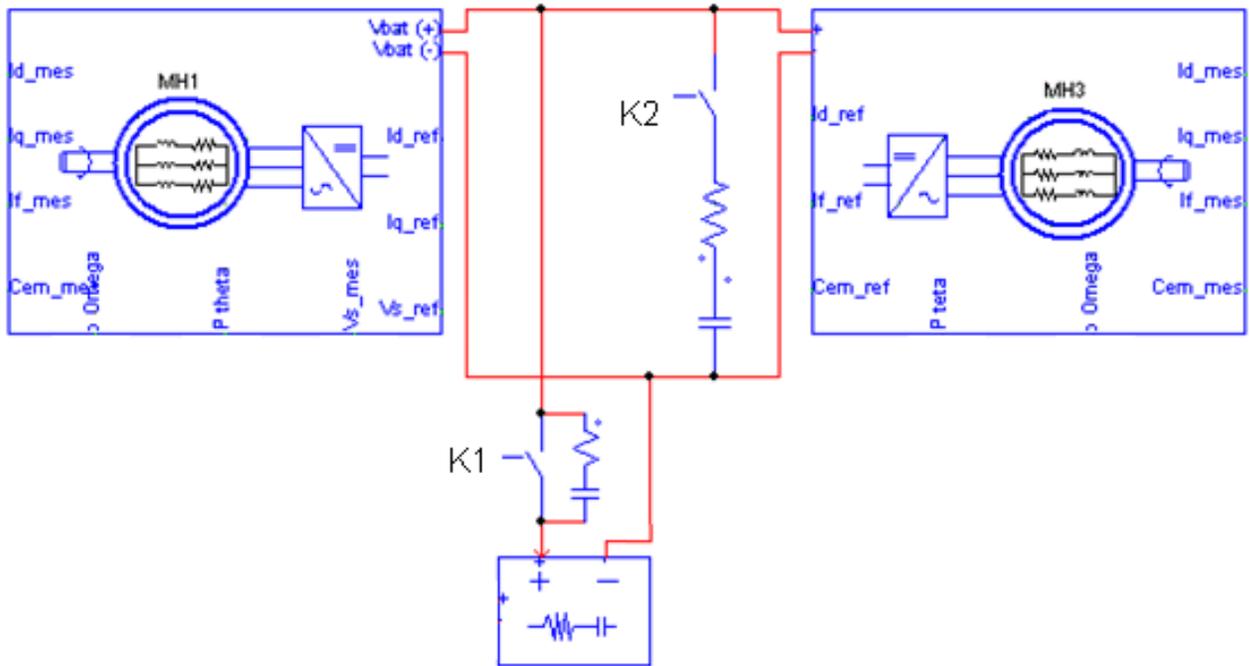
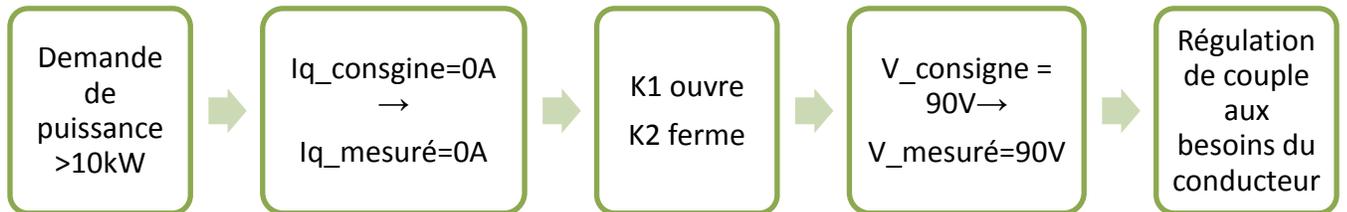


Figure 5.17 - Schéma réseau continu

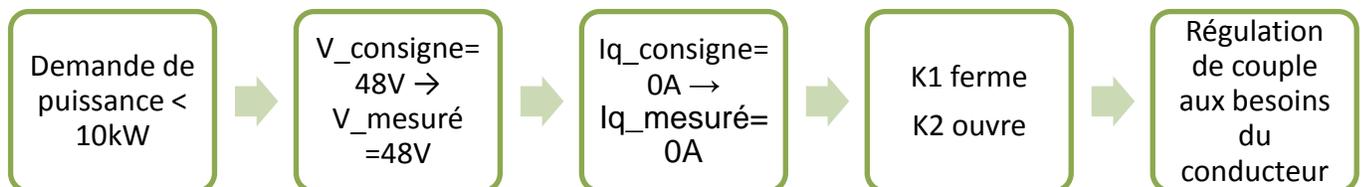
- Passage réseau 48V → 90V :

Pour l'augmentation du niveau de tension, le processus se passe de la manière suivante :



- Passage réseau 90V → 48V :

Pour revenir à une tension de 48V et reconnecter la batterie, il faut tenir compte des pas suivants :



La gestion des interrupteurs et l'adaptation des consignes sont réalisés à travers l'unité de contrôle du véhicule. Sous PSIM, cela peut être simulé à travers un bloc C, par contre je n'ai pas eu de temps de le réaliser.

5.4 Conclusion de l'étude des lois de contrôle

Cette étude nous a montré que l'adaptation du système n'exige pas grands changement. L'unité de contrôle étant déjà présente dans un véhicule hybride, il suffit juste une adaptation pour contrôler aussi ces changements du niveau de tension. Electriquement, l'ajout d'une capacitance et une résistance a été suffisante, ainsi comme deux interrupteurs.

6 Conclusion

Le projet dont ce rapport fait objet fut articulé en trois parties distinctes.

L'étude bibliographique a permis la compréhension et caractérisation de l'ensemble d'un véhicule hybride. L'analyse et recherche des véhicules du marché m'ont aidé à bien comprendre la problématique du sujet de mon stage. A travers l'analyse de la concurrence, j'ai pu constater qu'il n'existe pas encore dans le marché un véhicule Mild Hybride 4x4, c'est qui permet à Valeo d'envisager une dépose de brevet sur cette architecture.

L'étude énergétique réalisée nous a répondu quelques questions par rapport à la consommation du véhicule. Nous avons pu constater que le mode *Range Extender* apporte des gains d'émissions significatives, principalement aux demandes de basses puissances. Pour des puissances plus fortes, par contre, nous n'avons pas de gains trop significatifs. Cette étude n'est pourtant pas entièrement exhaustive, donc une étude énergétique plus minutieuse pourra donner des résultats plus précis, avec une co-simulation Amesim/Matlab.

Enfin, l'étude automatique a montré que l'adaptation du système pour accorder tout les modes proposés est simple et faisable. Le contrôle des machines réalisé est déjà implémenté sur les véhicules hybrides, et il suffit l'ajout de quelques composants électriques sur l'ensemble du véhicule. Une étude complémentaire reste à mener pour le dimensionnement des éléments passives et de la capacité entre les deux machines.

7 Bilan Personnel

Ce stage m'a été d'un grand intérêt dans la mesure où il m'a permis de perfectionner mes connaissances d'une manière interdisciplinaire. Le sujet étant l'étude d'un véhicule dans son ensemble, j'ai pu mettre en pratique et perfectionner mes connaissances en génie électrique acquis au cours de ces deux années passées à l'ENSEEIH et en même temps étudier d'autres éléments qui constituent une automobile, soit les parties mécaniques, système, etc.

Au cours de ce stage j'ai réalisé plusieurs réunions avec des spécialistes des différents métiers. Cela m'a permis d'avoir contact avec des différents départements, de remettre en question mes méthodes de travail et de développer mon sens de la communication. De plus la rédaction de ce rapport durant ces six mois m'a permis d'acquérir une rigueur certaine et d'améliorer mon français.

En plus, j'ai pu faire la connaissance du monde de l'entreprise sur un long terme et acquis une bonne expérience professionnelle : j'ai appris le fonctionnement d'une entreprise, les relations qui lient ses différents membres et l'attitude que chacun adopte lors de la réalisation d'un projet.

8 Glossaire

Abréviations

Acc	Accélérations	Plat	Plateaux
Batt	Batterie	PMF	Pression Moyenne de Frottement
Conso elec	Consommateurs Electriques	Regen	Régération
ECE	Urban Driving Cycle	REX	Range Extender
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle	SOC	State of charge
ICE	Internal Combustion Engine	Ucap	Ultra Capacité
Iexc	Courant du circuit d'excitation	VEH	Véhicule Electrique Hybride
Iexc_ref	Consigne de courant du circuit d'excitation	Vexc	Tension du circuit d'excitation
MH1	Mild Hybrid 1 (Position avant de la machine)	Vs	Tension continu en sortie du redresseur
MH3	Mild Hybrid 3 (Position arrière de la machine)	Vs_ref	Consigne de la tension en sortie du redresseur
Mth	Moteur Thermique	ZEV	Zero Emissions Vehicle
NEDC	New European Driving Cycle		

Symboles

α	Charge appliqué en relation à la demande du conducteur	M_f	Inductance mutuelle
C_{em}	Couple électromagnétique	η_{MH1}	Rendement de la machine MH1
C_r	Couple résistant	η_{MH3}	Rendement de la machine MH3
C_x	Couple de résistance au vent	P_{cal}	Pouvoir calorifique du carburant
C_{MH1}	Couple de la machine MH1	$P_{maxbatt}$	Puissance maximale délivrée par la batterie
ΔS_{cycle}	Espace total parcourue par le cycle NEDC	P_{MH1}	Puissance de la machine MH1
F_{em_d}	Force électromotrice de l'axe d	P_{MH3}	Puissance de la machine MH3
F_{em_q}	Force électromotrice de l'axe q	ρ_{air}	Densité de l'air
I_d	Courant de l'axe d	ρ_{carb}	Densité du carburant
I_f	Courant du circuit d'excitation	R_f	Resistance rotor
$I_{maxbatt}$	Courant maximale de la batterie	R_s	Resistance stator
I_q	Courant de l'axe q	S	Surface actif du véhicule
I_s	Courant dans le stator	ϕ_d	Flux dans l'axe d

L_d	Inductance équivalente de l'axe d	ϕ_f	Flux dans le circuit d'excitation
L_f	Inductance du circuit d'excitation	ϕ_q	Flux dans l'axe q
L_q	Inductance équivalente de l'axe q	ϕ_s	Flux stator
L_s	Inductance dans le stator	V	Vitesse véhicule
L_{sr}	Inductance mutuelle entre le stator et le rotor	V_d	Tension dans l'axe d
V_f	Tension du circuit d'excitation	ω_{MH1}	Vitesse angulaire de la machine MH1
V_q	Tension dans l'axe q	ω_{Mth}	Vitesse angulaire du moteur thermique
V_s	Tension dans le stator	ω_f	Vitesse angulaire rotor
$V_{a,b,c}$	Tension dans les 3 phases du stator	ω_s	Vitesse angulaire stator
$V_{maxbatt}$	Tension maximale de la batterie		

9 Bibliographie

- [1] JONASSON (K.) – *Analysing Hybrid Drive System Topologies* - Licentiate Thesis of the Department of Industrial Electrical Engineering and Automation – Lund (Suede), 2002.
- [2] LHOMME (W.) – *Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique* – Thèse de l'Université des Sciences et Technologies de Lille – Lille (France), nov, 2007.
- [3] WIKIPEDIA – *Four-wheel drive* - référence de février 2012 – disponible sur Internet <URL : http://en.wikipedia.org/wiki/Four-wheel_drive >.
- [4] How Stuff Works - référence de février 2012 – disponible sur Internet <URL : <http://auto.howstuffworks.com/four-wheel-drive.htm>>.
- [5] GAETAN (P.) – *Peugeot 3308 Hybrid4 : L'arrière-train* – Le Moniteur Automobile, 1508, p. 20-25, oct. 2011.
- [6] YVONNICK (G.) – *Lexus RX400h : un SUV au rapport performances / consommation / pollution imbattable* - auto-innovations.com, juin 2005.
- [7] WIKIPEDIA – AMESim – référence de janvier 2012 – disponible sur Internet <URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/AMESim>>.
- [8] SAFT – Industrial Battery Group – *User's Manual for Saft Li-ion VL 6P Cell* - jan. 2007.

- [9] MASTRAGOSTINO (M.) – *Lithium ion batteries and Supercapacitors for HEV* – Università de Bologna (Italy), avr. 2009.
- [10] HALPER (M.), ELLENBOGEN (J.) – *Supercapacitors: A Brief Overview* – MITRE Nanosystems Group, p.4, mar. 2006.
- [11] VIDO (L.) - Etude d'actionneurs électriques à double excitation destinés au transport. Dimensionnement de structures synchrones. – Ecole Normale Supérieure de Cachan, avr. 2010.