



# Approche systémique pour la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides thermiques-électriques

Rochdi Trigui

## ► To cite this version:

Rochdi Trigui. Approche systémique pour la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides thermiques-électriques. Energie électrique. Université des Sciences et Technologies de Lille, 2011. <tel-01356151v2>

**HAL Id: tel-01356151**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01356151v2>**

Submitted on 30 Aug 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Rapport de synthèse

Présenté à

L'Université des Sciences et Technologies de Lille

En vue d'obtenir

L'Habilitation à Diriger des Recherches

Par

**Rochdi TRIGUI**

Docteur en Génie électrique de l'INP Lorraine

---

# **Approche systémique pour la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides thermiques-électriques**

---

Soutenue le 15 septembre 2011

### **Membres du jury :**

<b>M. Seddik BACHA</b>	Prof. Université de Grenoble	Rapporteur
<b>M. Xavier ROBOAM</b>	Directeur de Recherche CNRS, INP Toulouse	Rapporteur
<b>M. Joeri VAN MIERLO</b>	Prof. Université de Bruxelles	Rapporteur
<b>M. Alain BOUSCAYROL</b>	Prof. Université de Lille 1	Directeur
<b>M. Eric BIDEAUX</b>	Prof. INSA de Lyon	Examineur
<b>M. Gérard COQUERY</b>	Directeur de Recherche IFSTTAR	Président
<b>M. Daniel HISSEL</b>	Prof. Université de Franche Comté, Belfort	Examineur
<b>M. Joseph BERETTA</b>	Direction des relations institutionnelles, PSA	Invité

# Résumé

Le véhicule hybride est un système complexe constitué de plusieurs sources et dont l'agencement de sa transmission peut faire appel à plusieurs composants. La possibilité d'avoir des dimensionnements différents de la batterie par rapport au moteur thermique, couplée aux diverses topologies possibles, représentent autant de degrés de liberté qui peuvent être exploités pour son optimisation énergétique. Le premier chapitre de ce mémoire expose cette diversité en présentant les différentes classifications usuelles des véhicules hybrides.

Mises à part quelques applications qui visent à augmenter les performances dynamiques des véhicules (vitesse et accélération), l'objectif de l'hybridation est principalement la réduction de la consommation énergétique et des émissions de polluants. C'est l'objectif énergétique qu'on considère dans ces travaux. Afin d'atteindre cet objectif, des optimisations sont nécessaires sur différents plans. Pour un usage donné, les performances énergétiques du véhicule hybride dépendent de trois aspects fortement interdépendants qui sont i) la topologie (série, parallèle, mixte) ii) le dimensionnement des composants iii) la stratégie de gestion de l'énergie entre les différentes sources.

Pour appréhender ces différentes dimensions et leur couplage, une approche systémique s'appuyant sur la modélisation a été mise en place avec les membres de l'équipe Véhicules électriques et hybrides du LTE. Cette approche a abouti au développement d'un outil de simulation, VEHLIB, qui a permis de capitaliser les différents travaux de modélisation. Cet outil, présenté dans le deuxième chapitre, a été utilisé ensuite pour servir les objectifs d'optimisation de la gestion de l'énergie et d'aide au dimensionnement optimal des véhicules hybrides. Dans le cadre du réseau MEGEVH<sup>1</sup>, une ouverture vers la Représentation Énergétique Macroscopique (REM, développée au L2EP) a permis de démontrer l'apport incontestable de la REM pour la synthèse systématique de la commande des systèmes.

Le chapitre III, consacré à la gestion de l'énergie, présente un état de l'art des méthodes développées ces dix dernières années, ainsi que notre contribution dans ce domaine. Cette dernière a consisté dans un premier temps en l'utilisation et l'amélioration des méthodes à base de règles expertes. Ensuite deux thèses ont proposé l'optimisation de la gestion de l'énergie de point de vue de la consommation de carburant. Tous ces travaux se sont appuyés sur une démarche utilisant la modélisation, ainsi que l'expérimentation sur banc d'essai à l'échelle 1 dans une configuration de véhicule émulé (Hardware In the Loop – HIL - simulation).

Il s'est posé également, pour le véhicule hybride, le problème de la taille relative de la batterie et des machines électriques vis-à-vis de la taille du moteur thermique. En effet, pour un cahier des charges dynamique donné, plusieurs dimensionnements peuvent être admissibles. Une procédure d'aide au dimensionnement optimal a été mise en œuvre dans l'équipe et a fait l'objet de travaux exposés dans le chapitre 4.

En théorie, la définition générale du véhicule hybride ne se limite pas à la version thermique - électrique qui a fait l'objet de la plus part de nos contributions jusqu'ici. D'autres possibilités d'association de sources (Pile à combustible, supercondensateurs, volant d'inertie, ...) sont envisagées et font l'objet de travaux récents. On peut parler dans ce cas de véhicule multi-sources. Tant au niveau des topologies, qu'au niveau de la gestion de l'énergie et du dimensionnement, des travaux de recherches sont encore nécessaires pour tenter de généraliser les concepts déjà développés pour le véhicule hybride thermique-électrique. L'utilisation de formalismes structurants à l'image de la REM permettrait d'appréhender la complexité croissante et de réaliser l'articulation entre les différents niveaux de commande, locale et globale. Sur ces différentes dimensions, des ouvertures et des perspectives sont détaillées dans le dernier chapitre de ce mémoire.

---

<sup>1</sup> Le réseau MEGEVH est un groupement collaboratif créé en 2006 à l'initiative du réseau RT3 du ministère de la recherche, sous la responsabilité du L2EP de l'Université Lille1. Le LTE participe depuis cette création à l'animation de ce réseau, constitué de laboratoires publics et d'industriels du domaine. Plusieurs collaborations scientifiques concernant la modélisation et la gestion de l'énergie des véhicules hybrides ont été menées dans le cadre de ce réseau.

# **English title: System approach to modeling, energy management and aid in the design of Hybrid Electric Vehicles**

## **Abstract**

The Hybrid Electric Vehicle is a complex system made up of several sources and the arrangement of its transmission can appeal to several components. The possibility of having different sizes of the battery compared to the combustion engine, coupled with the various possible topologies, represent as many degrees of freedom that can be exploited for its energy optimization. The first chapter of this paper exposes this diversity by presenting the different common classifications of hybrid electric vehicles.

Apart from a few applications that are intended to increase the dynamic performance of the vehicle (speed and acceleration), the goal of hybridization is mainly the reduction of energy consumption and emissions of pollutants. It is the energy target that is considered in this work. To achieve this goal, optimizations are needed on different plans. For a given use, the energy performance of the hybrid vehicle depends on three strongly interdependent aspects which are i) topology (series, parallel, dual) ii) the sizing of components iii) energy management strategy to share the instantaneous power demand.

To understand these different dimensions and their coupling, a systemic approach based on modelling was implemented with the Electric and Hybrid Vehicle team members. This approach has led to the development of a simulation tool, VEHLIB, that allowed to capitalizing different modelling works. This tool, which is presented in the second chapter, has then been used to serve the objectives of the energy management optimization and support the optimal design of hybrid vehicles. Under the MEGEVH network<sup>[1]</sup>, an opening towards the Energetic Macroscopic Representation (EMR, developed by the L2EP) showed the undeniable contribution of the EMR to the systematic synthesis of complex systems' control.

Chapter III, dedicated to energy management, presents a State of the art of the methods developed these past ten years, and our contribution in this area. The latter was initially in the use and improvement of the rule based methods. Then two theses under my supervision proposed the optimization of the energy management in terms of fuel consumption. All these works relied on an approach using modeling, as well as experimentation on a test bench in an emulated vehicle configuration (Hardware In the Loop - HIL - simulation).

Was also highlighted for the hybrid electric vehicles the problem of the relative size of the battery and electrical machines compared to the size of the combustion engine. Indeed, for a given dynamic specifications, several sizing may qualify. A help to the optimal sizing procedure has been implemented in the team and has been the subject of work described in Chapter 4.

Theoretically, the general definition of hybrid vehicles is not limited to thermal - electric version which was the subject of the majority of our contributions so far. Other possibilities for association of sources (fuel cell, supercapacitors, flywheel, ...) are being considered and are the subject of recent work. We can speak in this case of multi-source vehicle. Either at topology level or at the level of the energy management and components' sizing, research is still needed to try to generalize the concepts already developed for the hybrid electric vehicle. The use of structuring formalisms like the EMR would help to understand the growing complexity and achieve the articulation between the different levels of control, local and global. On these different dimensions, perspectives and opportunities are detailed in the last chapter of this report.

---

<sup>[1]</sup>MEGEVH network is a collaborative group created in 2006 at the initiative of the network RT3 of the Ministry of research, under the responsibility of the L2EP of the University Lille1. LTE participates to the steering committee since the creation of this network. MEGEVH is made up of public laboratories and manufacturers in the field. Several scientific collaborations on the modeling and energy management of hybrid vehicles have been conducted as part of this network.

## Remerciements

La première reconnaissance que j'ai envie d'exprimer à l'issue de ce travail s'adresse à tous les membres de l'équipe Véhicule Electriques et Hybrides du LTE, sans qui ce travail n'aurait jamais abouti aux réalisations présentées dans ce document. Particulièrement, je tiens à remercier Bruno Jeannert avec qui l'aventure VEHLIB et la plateforme temps réel a été très enrichissante. Emmanuel Vinot nous a rejoint dans cette aventure et nous a réalisé des belles avancées, tous mes remerciements pour ses collaborations au quotidien. Serge Pelissier et ses batteries qui vieillissent nous a concocté de bons modèles de batteries avec l'aide de Maxime Montaru et plus tard Eduardo-Redondo et Arnaud Devis, grand merci pour sa disponibilité. Merci également à nos hommes aux manettes des bancs d'essai et des prototypes, Bertrand et Stéphane pour leur travail et leur patience. Enfin, ne pas oublier « mes » thésards (Julien, Souad, Anne Laure et la dernière arrivante Felicitas) ainsi que les thésards du L2EP avec qui j'ai apprécié de travailler (Walter et Keyu), qui sont passés par là et dont le travail est largement repris dans ce document.

Je voudrai exprimer également ma profonde gratitude à mon collègue le Professeur Alain Bouscayrol, l'initiateur du Réseau MEGEVH (voir annexe1) pour toutes ses collaborations durant plus de 5 ans, et avec qui l'aventure continue grâce au mot magique : la REM. Ses remarques et discussions m'ont été précieuses pour la réalisation de ce document.

Mes vifs remerciements s'adressent aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de plancher sur ce travail. D'abord les rapporteurs : Prof. Seddik Bacha, Xavier Roboam Directeur de Recherche et Prof. Joeri Van Mierlo, pour leurs disponibilités en cette période préestivale. Egalement grand merci au Prof. Daniel Hissel, le Prof Eric Bideaux, Gérard Cocquery Directeur de Recherche IFSTTAR et Mr Joseph Beretta de la direction des relations institutionnelles de PSA Peugeot Citroën, qui ont bien voulu participer à ce jury.

Merci à Philippe Dupuy, directeur du LTE pour son encouragement à franchir ce cap. Merci également à tous les collègues du LTE pour les échanges autour du thème du transport et de l'environnement qui anime notre quotidien.

Et je finirai par un petit coucou de remerciement à ma petite famille, Claire, Adam, Louisa et Sarah qui ont supporté mes humeurs un peu spéciales ces derniers mois. Merci pour leur soutien ainsi que celui de toute ma famille Tunisienne.

*A la mémoire de ceux qui ont donné leur vie pour la liberté des autres,*

*à la révolution du Jasmin.*

*A toute ma famille Franco-Tunisienne.*

*« Aie l'habitude de tenir à la main un fil de Plomb pour pouvoir apprécier l'inclinaison  
des choses »*

*Léonard De Vinci*

# TABLES DES MATIERES

<b>1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>1 CHAPITRE 1 : LES VÉHICULES HYBRIDES. CONTEXTE ET CLASSIFICATION....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Contexte .....</b>	<b>5</b>
1.2.1 La mobilité des personnes en France et en Europe .....	5
1.2.2 Les nuisances des transports.....	6
1.2.3 Les moyens d'actions.....	10
<b>1.3 Etat de l'art des technologies électriques et hybrides .....</b>	<b>12</b>
1.3.1 Le véhicule électrique : des réponses mais aussi des questions .....	12
1.3.2 Le Véhicule hybride : origines, définitions et constituants .....	13
<b>1.4 Classification des hybrides thermiques-électriques.....</b>	<b>23</b>
1.4.1 Classification des VHTE selon la topologie .....	23
1.4.2 Classification selon les fonctions et le taux d'hybridation .....	29
1.4.3 Les différents niveaux de commandes .....	31
<b>1.5 Approche systémique pour l'optimisation et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides</b>	<b>32</b>
1.5.1 Position du problème .....	32
1.5.2 Approche systémique pour la simulation des véhicules hybrides.....	34
1.5.3 Gestion de l'énergie .....	35
1.5.4 Aide au dimensionnement .....	35
<b>1.6 Conclusion .....</b>	<b>36</b>
<b>2 CHAPITRE 2 : OUTILS ET MÉTHODES POUR LA SIMULATION DES VÉHICULES HYBRIDES .....</b>	<b>37</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2 Généralités et état de l'art .....</b>	<b>37</b>
2.2.1 La systémique .....	37
2.2.2 Les différents types de modèles.....	39
2.2.3 Les représentations énergétiques et dynamiques des systèmes appliquées aux véhicules hybrides	40
2.2.4 La REM.....	44
2.2.5 Les logiciels de simulation des véhicules hybrides .....	45
<b>2.3 Outils de simulation de véhicules hybrides : présentation du logiciel VEHLIB. ....</b>	<b>46</b>
2.3.1 Rappel des objectifs.....	46
2.3.2 Approche mixte bond graph/schéma bloc .....	47
2.3.3 La représentation retenue.....	49
2.3.4 Les modèles des sous-systèmes .....	50
2.3.5 Les modèles inverses associés à VEHLIB.....	52
<b>2.4 Exemples d'application .....</b>	<b>53</b>
2.4.1 Synthèse d'un modèle de véhicule hybride série parallèle avec train épicycloïdal. Validation avec le véhicule Toyota Prius. ....	53

2.4.2	Emulation temps réel de véhicules hybrides utilisant VEHLIB .....	57
2.4.3	Modèle inverse d'un véhicule hybride série .....	60
<b>2.5</b>	<b>Ouverture vers la REM .....</b>	<b>61</b>
2.5.1	Les limites de l'approche de l'outil unique.....	61
2.5.2	Multi-Modèle à commutation pour la simulation de l'embrayage .....	62
2.5.3	Commande par inversion de Modèle générique de véhicules hybrides .....	64
<b>2.6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>65</b>
<b>3</b>	<b>CHAPITRE 3 : GESTION DE L'ÉNERGIE DANS LES VÉHICULES HYBRIDES .....</b>	<b>67</b>
<b>3.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>67</b>
<b>3.2</b>	<b>Généralités et état de l'art .....</b>	<b>67</b>
3.2.1	Position du problème .....	67
3.2.2	La gestion de la batterie .....	68
3.2.3	Les différentes méthodes de gestion de l'énergie .....	70
<b>3.3</b>	<b>Contribution à l'amélioration des stratégies de gestion de l'énergie.....</b>	<b>77</b>
3.3.1	Stratégie mixte suivi de puissance et thermostat .....	77
3.3.2	Utilisation des réseaux de neurones pour une commande sous optimale .....	79
3.3.3	Le $\lambda$ - contrôle .....	83
<b>3.4</b>	<b>Quelques cas d'application .....</b>	<b>86</b>
3.4.1	Implantation de la Stratégie mixte « thermostat »-suivi de puissance sur un banc « PHIL » ..	86
3.4.2	Stratégie $\lambda$ -contrôle pour la Gestion de l'énergie d'un véhicule hybride parallèle à 1 embrayage	89
<b>3.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>94</b>
<b>4</b>	<b>CHAPITRE 4 : AIDE AU DIMENSIONNEMENT DES VÉHICULES HYBRIDES.....</b>	<b>97</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>97</b>
<b>4.2</b>	<b>Le cahier des charges et méthodologie .....</b>	<b>97</b>
4.2.1	Cahier des charges.....	97
4.2.2	Considérations préalables .....	100
4.2.3	Méthodologie d'aide au dimensionnement optimal.....	101
4.2.4	Adaptation de la puissance des composants selon la topologie hybride.....	102
<b>4.3</b>	<b>Méthodes de dimensionnement des composants.....</b>	<b>104</b>
4.3.1	Dimensionnement du moteur thermique .....	104
4.3.2	Dimensionnement de l'association convertisseur machine électrique.....	106
4.3.3	Dimensionnement de la batterie .....	110
<b>4.4</b>	<b>Application : aide au dimensionnement d'un véhicule hybride parallèle diesel .....</b>	<b>115</b>
4.4.1	Cahier des charges et hypothèses de calcul .....	115
4.4.2	Gestion de l'énergie .....	117
4.4.3	Résultats et discussion .....	117
<b>4.5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>121</b>

<b>5</b>	<b>CHAPITRE 5 : LE VÉHICULE MULTI-SOURCES. TRAVAUX EN COURS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>123</b>
5.1	Introduction.....	123
5.2	Perspective sur les Topologies .....	123
5.2.1	Vers des systèmes multi-sources.....	123
5.2.2	Vers des éléments de stockage mixtes.....	124
5.2.3	Vers des sources multiples .....	127
5.2.4	Vers des transmissions plus complexes mais plus intégrées.....	128
5.2.5	Bilan.....	130
5.3	Perspectives pour la gestion de l'énergie .....	131
5.3.1	Vers une gestion de l'énergie multi-sources .....	131
5.3.2	Vers une optimisation multi-objectifs .....	133
5.3.3	Vers des critères plus globaux .....	134
5.3.4	Bilan .....	135
5.4	Perspectives pour le dimensionnement .....	136
5.4.1	Vers un dimensionnement adapté à la mission .....	136
5.4.2	Vers le couplage de modèle pour l'aide au dimensionnement.....	137
5.4.3	Bilan .....	137
5.5	Perspective sur la prise en compte des contraintes extérieures.....	138
5.5.1	Le triplet conducteur/trafic/infrastructure .....	138
5.5.2	Vers la prise en compte du comportement du conducteur .....	138
5.5.3	Les NTIC pour la prise en compte du trafic et de l'infrastructure .....	139
5.5.4	Bilan .....	140
5.6	Conclusion .....	140
<b>6</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>141</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>143</b>
7.1	Annexe 1 : Réseau MEGEVH.....	145
7.1.1	Historique et pilotage.....	145
7.1.2	Objectifs et organisation scientifique.....	145
7.1.3	Partenaires et intégrations.....	147
7.1.4	Animation scientifique et promotion .....	148
7.1.5	Bilan scientifique depuis 2005.....	148
7.2	Annexes 2 : Pollution atmosphérique et normes pour les véhicules automobiles .....	149
7.2.1	Les phénomènes engendrés par les émissions de polluants.....	149
7.2.2	Normes pour véhicules diesel, valeurs en mg/km .....	150
7.2.3	Normes pour véhicules à essence, valeurs en mg/km .....	150
7.2.4	Comparaison des normes de pollution des véhicules en France aux Etats Unis et au Japon .....	151
7.3	Annexe 3 : Différents niveaux de modèle de l'association convertisseur-machine électrique dans VEHLIB. ....	153
7.3.1	Définitions et représentations.....	153
7.3.2	Modèle comportemental quasi-statique .....	153
7.3.3	Modèle de connaissance dynamique .....	154
7.3.4	Modèle de connaissance quasi-statique .....	155

<b>7.4</b>	<b>Annexe 4 : Les différents modèles de batterie dans VEHLIB.....</b>	<b>157</b>
7.4.1	Modèle statique .....	157
7.4.2	Modèle statique à paramètres variables.....	157
7.4.3	Modèle dynamique .....	157
<b>7.5</b>	<b>Annexe 5 : Présentation de la plateforme expérimentale du LTE de l'IFSTTAR.....</b>	<b>159</b>
7.5.1	Présentation du banc dynamique .....	159
7.5.2	Moyen de mesure de la consommation et des polluants .....	160
<b>7.6</b>	<b>Annexe 6 : Le véhicule prototype Microbus de Gruau .....</b>	<b>161</b>
<b>7.7</b>	<b>Annexe 7 : méthode du minimum de Pontriaguine .....</b>	<b>163</b>
<b>7.8</b>	<b>Annexe 8 : Résultats expérimentaux du microbus avec stockage mixte .....</b>	<b>165</b>
<b>7.9</b>	<b>Annexe 9 : Couplage de VEHLIB avec un programme de dimensionnement d'ACM .....</b>	<b>169</b>
7.9.1	Principe.....	169
7.9.2	Exemple d'application : Dimensionnement d'un Alterno-démarreur intégré .....	170
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>171</b>
<b>9</b>	<b>CV ET LISTE DES PUBLICATIONS.....</b>	<b>193</b>

# **1 Introduction générale**

La croissance économique et sociale a été longtemps associée à la performance des divers moyens de transport (Zeroual & C. Meunier 2006). Pour le transport terrestre, les différents secteurs de la mobilité : individuelle des personnes, les services de transport en commun, le transport de marchandise etc., ont profité des développements technologiques des motorisations, essentiellement thermiques, de plus en plus performantes pour se généraliser dans l'activité humaine. Cependant, basée sur une consommation d'énergie majoritairement d'origine fossile, ces mêmes moyens de transport sont associés aujourd'hui à des nuisances environnementales diverses. D'autre part, la fin annoncée des réserves de ressources fossiles remet en question la suprématie de la propulsion thermique dans les transports. Bien que le moteur thermique (essence, diesel, gaz) ait réalisé ces dernières décennies des avancées conséquentes d'efficacité et de dépollution, la recherche de motorisations alternatives introduisant une part d'électricité n'a pas cessé depuis la mise en œuvre des premiers véhicules électriques. Les solutions associant les deux types de motorisation thermique et électriques, appelées hybrides, ont été également étudiées et développées. Visant à tirer partie des avantages de chaque type d'énergie, ce type de véhicule permet en théorie de rendre les mêmes services de mobilité tout en maîtrisant les nuisances environnementales notamment en zones urbaines et périurbaines. En revanche, la complexité des architectures possibles de la chaîne de traction, et la nécessité d'un élément de stockage de taille et de performances optimales, fiable et économiquement accessible, a nécessité et nécessite encore des recherches multiples.

Les travaux de recherches concernant les véhicules hybrides ont été abondants ces deux dernières décennies (C. C. Chan & K. T. Chau 2001.), (Mehrdad Ehsani et al. 2005). Ces travaux concernent la conception de composants comme les batteries (Broussely 2007), les supercondensateurs (Sartorelli et al. 2007), (J. R. Miller & Burke 2008), les convertisseurs de puissance (Coquery et al. 2003), les machines électriques séparées ou intégrées au bloc moteur (M. Ehsani et al. 1997) etc., jusqu'à des approches systémiques globales, souvent de type énergétique multi-physique, en passant par le développement de méthodes de contrôle sophistiquées (S. Delprat et al. 2004), (Salmasi 2007) du véhicule et de ses composants (Bose & Szczyzny 1988).

Dans le contexte énergétique et environnemental actuel, le véhicule hybride, avec ses différentes catégories, constitue une alternative possible pour une économie d'énergie et une réduction des émissions de polluant (R. Trigui et al. 2003). En revanche, l'introduction de batteries à haute densité de puissance ou/et à haute densité d'énergie, ainsi que de machines électriques énergétiquement performantes s'accompagne d'un surcoût économique voire environnemental selon le type de batterie et son taux de recyclage. Il est alors impératif d'optimiser la conception et la commande de ce type de véhicule pour une possibilité de diffusion massive.

Afin de pouvoir optimiser l'hybridation de point de vue de critères diverses (énergétiques, environnementaux, économiques ...) une approche systémique est indispensable. La transdisciplinarité qui existe dans le système global qui est le véhicule hybride nécessite des expertises dans différents domaines de la physique et conduit à une démarche collaborative

entre différents acteurs. Il est à noter qu'une telle approche est très récente tant en Génie Electrique que dans le domaine automobile (Chan et al. 2010). En Génie électrique des travaux ont cependant été réalisés dans ce cadre sur la conception des systèmes électriques (Astier 2003) et sur leurs commandes (Alain Bouscayrol 2003). Pour les véhicules, ceci s'explique par la culture mécanique qui a été la base de l'industrie automobile pendant plus d'un siècle.

Pour notre part, une approche systémique s'appuyant sur la modélisation et les essais de composants et de véhicules a été mise en place depuis une quinzaine d'année dans l'équipe véhicule électrique et hybride du Laboratoire Transport et Environnement (LTE). Cette approche a conduit au développement d'outil de simulation sous Fortran dans un premier temps (logiciel VERT 1990) puis sous Matlab- Simulink (logiciel VEHLIB 1998). Ce dernier outil, nous a permis de réaliser des travaux de recherche relevant de la gestion de l'énergie et de l'aide au dimensionnement de différentes topologies de véhicule hybrides. La collaboration en interne avec des laboratoires de l'IFSTTAR (Laboratoire des Technologies Nouvelles), ainsi qu'avec des industriels du domaine, a permis d'étoffer les modèles et de réaliser des expérimentations sur des composants et des véhicules, soit récemment industrialisés, soit au stade de prototype. Des projets de recherches internes à l'institut (projet HYBRID) ou dans le cadre du PREDIT, du FUI ou/et financés par l'ADEME ont permis de capitaliser, grâce à l'outil VEHLIB et sa base de données associée, différents modèles validés de véhicules hybrides.

Ce travail collaboratif, nécessaire pour appréhender la complexité du véhicule hybride, s'est conforté par la contribution à la création et à la co-animation d'un réseau thématique sur la modélisation et la gestion de l'énergie des véhicules hybrides (réseau MEGEVH). Emanant à la base de l'initiative RT3 du ministère de la recherche, ce réseau regroupe aujourd'hui 10 laboratoires publics et 7 industriels (voir annexe 1). Parmi les résultats significatifs des travaux du réseau on peut souligner l'utilisation de la Représentation Energétique Macroscopique (REM, développée au L2EP de Lille) comme méthode fédératrice de développement de modèles de véhicules hybrides et de synthèse systématique de leurs commandes. Nous nous sommes donc impliqués dans divers projets du réseau et avec divers partenaires pour un travail dans une démarche réellement systémique où les compétences de chaque partenaire ont pu s'exprimer à travers le formalisme REM. Un lien avec nos logiciels (VELHIB) et nos plateformes a ainsi été réalisé.

La modélisation des véhicules hybrides permet de réaliser avec une assez bonne précision des études comparatives de topologies et de dimensionnement et de développer des commandes. En revanche, certains éléments comme la batterie où les émissions de polluants du moteur thermique sont difficiles à modéliser finement. Pour cela, une démarche de type émulation temps réel (ou HIL simulation, « Hardware In the Loop ») permettant d'émuler certaines parties du véhicule, et utilisant un banc moteur de haute dynamique pour tester d'autres parties, a été mise en place au LTE. Elle permet d'une part d'éliminer l'influence de certaines erreurs de modélisation, et d'autre part de valider l'efficacité des lois de gestion de l'énergie développées par simulation.

Nous nous proposons dans ce mémoire de réaliser la synthèse de nos contributions dans le domaine de la modélisation et de la gestion de l'énergie des véhicules hybrides tout en essayant à chaque fois de les situer par rapport à l'état de l'art. Le premier chapitre de ce document restitue le contexte de la mobilité et ses externalités qui aboutissent à la recherche de solutions alternatives. Comme alternative possible, l'hybridation est ensuite présentée avec

un état de l'art sur les différentes classifications selon les topologies et la taille des composants. Les objectifs des travaux réalisés sont ensuite exposés.

Dans le deuxième chapitre, après une présentation de l'approche systémique et une revue de quelques méthodes de représentation dynamiques utilisées pour l'aide à la modélisation et à la commande des véhicules hybrides, en particulier la REM, les outils développés au LTE sont présentés. Leur utilisation est ensuite illustrée par des exemples.

La gestion de l'énergie fera l'objet du troisième chapitre où une classification des méthodes utilisées est présentée. La contribution concernant l'amélioration de ces méthodes est exposée avec des exemples d'application.

Une aide au dimensionnement des composants du véhicule hybride a constitué également une partie de nos travaux. La méthodologie, encore en cours d'amélioration, est exposée dans le chapitre 4 avec une étude montrant le type de résultat obtenu.

Le cinquième chapitre sera consacré à une discussion et aux perspectives sur la possibilité d'extension de certaines méthodes développées pour le véhicule hybride thermique-électrique ou pour le stockage mixte batterie-supercondensateur en utilisant la REM à l'étude du cas général du véhicule multi-source.



# 1 Chapitre 1 : Les véhicules hybrides. Contexte et classification

## 1.1 Introduction

Les moyens de transport utilisant la motorisation thermique ont connu une utilisation intensive dans la mobilité des personnes et des marchandises avec une évolution considérable dans différents domaines : compacité, efficacité, sobriété... Ils restent néanmoins responsables de nuisances directes et indirectes principalement dues à l'utilisation de la combustion d'hydrocarbures d'origine fossile. Dans ce chapitre un tour d'horizon sur la mobilité et son évolution, sur les transports et leurs nuisances ainsi que sur les solutions technologiques attendues est brièvement réalisé. Après la mise en évidence d'une nécessaire modification du cahier des charges demandé aux moyens de transport du futur, les solutions hybrides sont présentées et discutées. En particulier le véhicule hybride thermique électrique, sujet central de ce travail, est décliné dans ses différentes configurations et suivant les différents dimensionnements de ses composants. Enfin, l'introduction des différents niveaux de commande du véhicule hybride permet d'exposer la problématique générale du travail concernant la modélisation, la gestion de l'énergie et l'aide à l'éco-conception de ce type de véhicule.

## 1.2 Contexte

### 1.2.1 La mobilité des personnes en France et en Europe

L'enquête nationale de mobilité organisée tous les dix ans par l'INSEE et l'INRETS a publié récemment ses résultats pour l'année 2008 (Armoogum et al. 2010). Elle a mis en évidence les évolutions observées par rapport aux deux précédentes enquêtes de 1982 et 1994. Les conclusions montrent les tendances suivantes.

- Concernant la mobilité par personne (Figure 1-1), la distance journalière moyenne a augmenté de 17 km en 1982 à environ 25 km en 2008. Cette moyenne prend en compte toute la population y compris celle qui n'effectue aucun déplacement par jour.

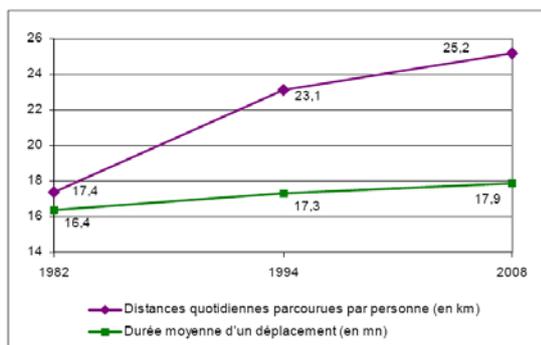


Figure 1-1 : distance journalière moyenne et durée moyenne de déplacement par personne

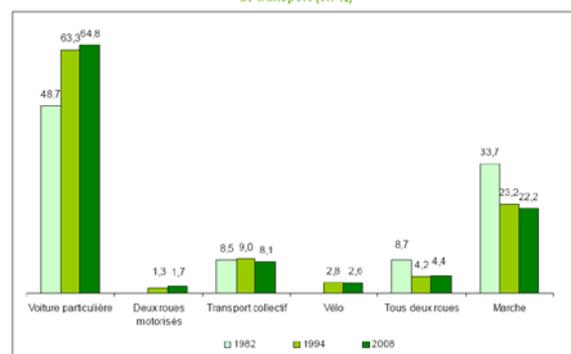


Figure 1-2 : évolution de la répartition de la mobilité en France par mode de transport

- Pour la répartition des déplacements par mode de transport (Figure 1-2), il a été constaté que, contrairement à la tendance observée dans certaines grandes agglomérations (Paris, Lyon, Lille), la voiture particulière gagne encore du terrain au niveau national. Les déplacements avec ce mode ont constitué en 2008 65% des trajets au lieu de 49 % en 1982.

Cette croissance semble en revanche en diminution nette puisqu'elle a représenté environ 2.5 % de 1994 à 2008, comparée à 29 % de croissance entre 1982 et 1994.

L'analyse des distances parcourues montre également que la voiture particulière représente le moyen de transport quasi exclusif pour la mobilité locale (seulement 3 % est attribué au transport en commun et 1 % pour les deux roues) (Figure 1-3). Elle reste également majoritaire (56 %) pour les déplacements dits de longue distance (dans un rayon supérieur à 80 km du domicile).

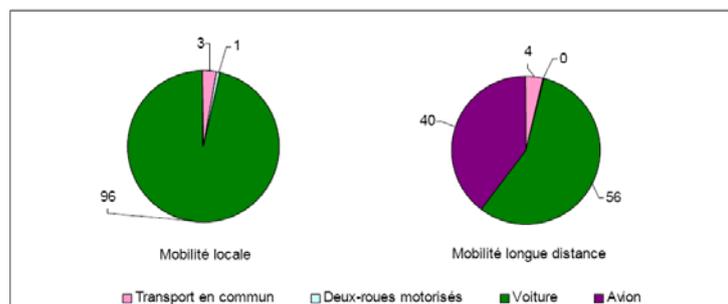


Figure 1-3 : mode de transport selon le type de déplacement

Au niveau Européen, les statistiques du nombre de voitures par personne montrent une évolution d'environ 25 % entre 1990 et 2003 (Tableau 1-1, (European community 2007)). Ce qui corrobore un usage plus intense de ce mode de transport pour le cas de la France (Armoogum et al. 2010).

Tableau 1-1 : Evolution du nombre de véhicules particuliers en Europe des 25 (EU 25) et Europe des 15 (EU 15) entre 1990 et 2003

	EU 25			EU 15		
	1990	2003	Change	1990	2003	Change
Number of cars per 1000 inhabitants	355	465	+ 31%	394	495	+ 26%
Vehicle stock (Million)	156	212	+ 36%	144	179	+ 24%

## 1.2.2 Les nuisances des transports

### 1.2.2.1 La pollution atmosphérique

Les polluants émis par les moyens de transports sont de nature et de nocivité diverses.

Une classification selon le phénomène généré par ces polluants est donnée par le CITEPA<sup>1</sup> (CITEPA 2011). Les phénomènes mis en jeu sont principalement l'acidification ou pluies acides, l'eutrophisation, la pollution photochimique, l'appauvrissement de la couche d'ozone et les effets directs et indirects sur la santé. Pour plus de détail sur ces phénomènes voir l'annexe 2.

<sup>1</sup> CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique

Les transports participent à l'émission d'une grande partie de ces polluants. Ils sont généralement classés en deux catégories, les polluants réglementés (CO, HC, NO<sub>x</sub>, particules) et les polluants non réglementés (COV, HAP<sup>2</sup>, mercure, pesticides, furannes, ...).

Le rapport de l'AEE (EEA 2008) présente la part en Europe en 2005 des différents secteurs d'activité dans les émissions de polluants, classées selon les phénomènes dont ils sont responsables. Les résultats de ce rapport montrent que le transport est responsable de l'émission de 41.7 % des gaz participant à l'appauvrissement de la couche d'ozone, de 17% de substances acidifiantes et de 21 % de particules.

Globalement ces émissions de polluant sont en régression considérable avoisinant les 50% pour les trois phénomènes entre 1990 et 2005.

En France la tendance de baisse des émissions des polluants réglementés est également bien visible à partir des années 90. L'étude Joumard (Joumard 2002) montre cette inflexion observée jusqu'à l'an 2000 (Figure 1-4). A partir de cette date, les extrapolations prévoient une poursuite de la baisse importante avec une saturation intervenant vers 2015.

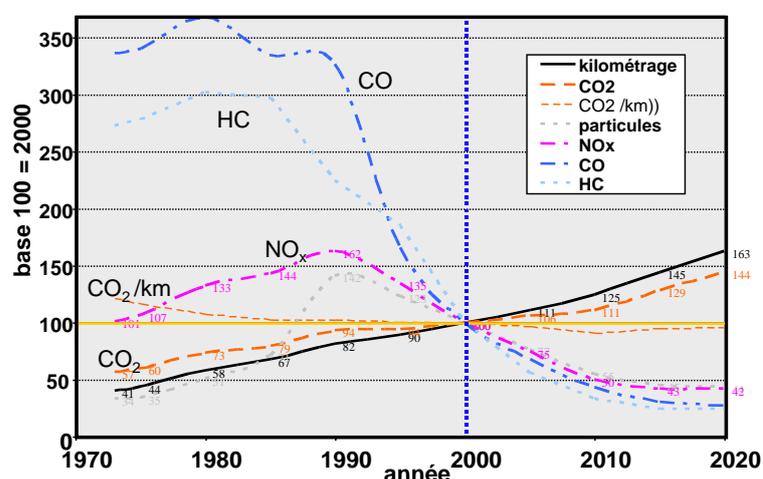


Figure 1-4 : Evolution et prospective des émissions de polluants dus aux transports en France

L'explication de ces baisses est incontestablement les dispositifs de dépollution : pots catalytiques à 3 voies concernant les CO, HC et NO<sub>x</sub> et le filtre (FAP) pour les particules.

Ces dispositifs, de plus en plus performants ont été mis en œuvre suite à une politique Européenne et mondiale s'appuyant sur des normes de plus en plus sévères. La norme Euro 6 en préparation prévoit une diminution conséquente des émissions de NO<sub>x</sub> et de particules visant à rapprocher les émissions des moteurs diesel de celles des moteurs essence (voir annexe 2).

### 1.2.2.2 Les émissions de gaz à effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet de maintenir une température modérée de la terre. Les rayons de soleil, empêchés de ressortir de l'atmosphère par des gaz et de la vapeur d'eau après réflexion à la surface de la terre, participent au réchauffement de cette atmosphère. Depuis quelques décennies l'activité humaine a généré une émission

<sup>2</sup> Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

intensive de gaz responsables de cet effet, notamment suite à une utilisation forte d'énergie fossile. Cette émission à croissance accélérée est aujourd'hui identifiée comme responsable d'un réchauffement climatique futur qui entrainerait des catastrophes naturelles plus fréquentes (GIEC 2007). Parmi les gaz responsables de l'effet de serre sont aujourd'hui identifiés ceux à effet direct ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{HFC}^3$ ,  $\text{PFC}^4$ , et  $\text{SF}_6$ ) et ceux à effet indirect ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{COVNM}^5$ , et  $\text{CO}$ ) (CITEPA 2009). La Figure 1-5 donne la part dans le monde de la contribution de chaque gaz ainsi que la répartition par secteur (Comité des constructeurs Français d'automobile 2008).

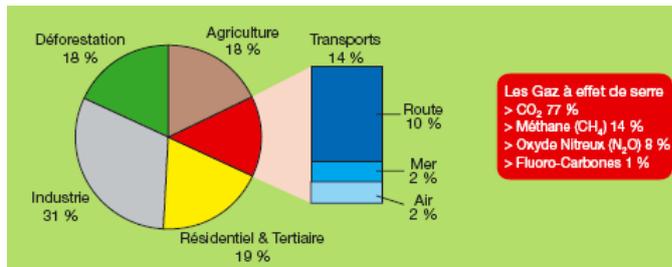


Figure 1-5 : Répartition des émissions de gaz à effet de Serre dans le monde selon le secteur (année 2000).

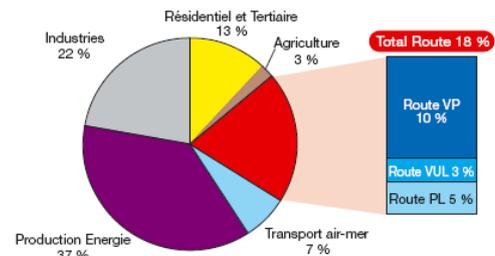


Figure 1-6 : Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde selon le secteur (année 2000)

Pour le cas particulier du CO<sub>2</sub>, premier contributeur à cet effet (77 % environ (Comité des constructeurs Français d'automobile 2008)), la concentration dans l'atmosphère est passée de 280 ppm<sup>6</sup> au milieu du 18e siècle à 383 ppm en 2007 avec un taux de croissance soutenu durant les dernières décennies. D'après les dernières estimations de l'AIE, les émissions mondiales en 2006 dues à l'utilisation de l'énergie sont en hausse de 3,5 % par rapport à 2005 avec un total de 28 Gt de CO<sub>2</sub> (Louati 2009). Au niveau mondial, le secteur des transports contribue pour environ 25 % à ces émissions (Figure 1-6) (36 % pour le cas de la France (ADEME 2009).). En Europe les transports sont responsables d'environ 19% des émissions de Gaz à effet de serre (EEA 2008).

Globalement, les émissions de CO<sub>2</sub> sont en baisse en France (Louati 2009) et en Europe (AEU 2010). En revanche, le secteur des transports est l'un des deux seuls secteurs en hausse, due principalement à l'augmentation de la mobilité. Les accords mondiaux de Kyoto ont fixé des objectifs pour les différents participants depuis 1997, entrés en vigueur en 2005 (CITEPA 2009). L'Europe est en passe de réaliser ces objectifs à court terme avec un objectif à moyen terme représentant 20% de baisse en 2020 par rapport aux émissions de 1990 (CE 2009).

### 1.2.2.3 La consommation d'énergie

Le transport est le secteur le plus consommateur d'énergie fossile en Europe (Figure 1-7) (EEA 2010). En France l'écart est encore plus important de par la nature du mix énergétique de génération de l'électricité peu consommateur de produit pétroliers (Figure 1-8) (ADEME 2009).

<sup>3</sup> hydrofluorocarbures

<sup>4</sup> perfluorocarbures

<sup>5</sup> Composés Organiques Volatiles Non Méthaniques

<sup>6</sup> Particule par million

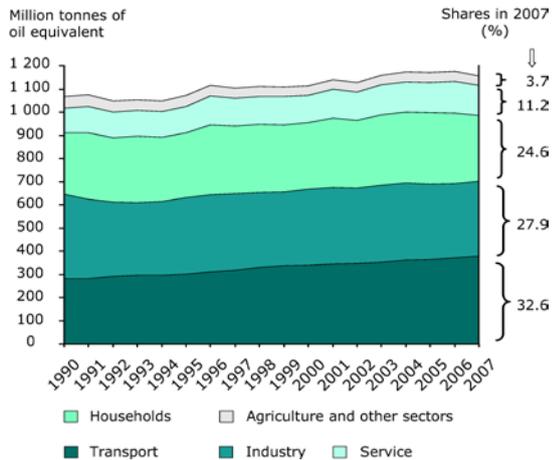


Figure 1-7 : Répartition de la consommation d'énergie fossile selon le secteur en Europe

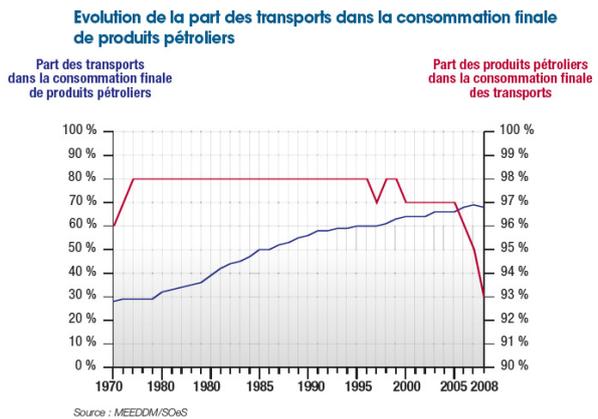


Figure 1-8 : Evolution de la part des transports dans la consommation des produits pétroliers

La consommation incontrôlée du pétrole et de ses dérivés renforce le processus de déclin des réserves pétrolières par rapport à une demande en constante augmentation. Les résultats de deux études (Theoil Drum 2011) et (AIE 2010) convergent vers des conclusions très proches concernant le pic de production (pic de Hubbert) déjà atteint en 2006 avec une prévision de décroissance rapide à un horizon assez proche (2020 à 2030).

La consommation énergétique des transports est accentuée par une efficacité réduite des moteurs thermiques. Malgré des évolutions technologiques continues, y compris les plus récentes pour le moteur diesel en Europe, le rendement maximal des moteurs à combustion interne reste bien inférieur à 45 %.

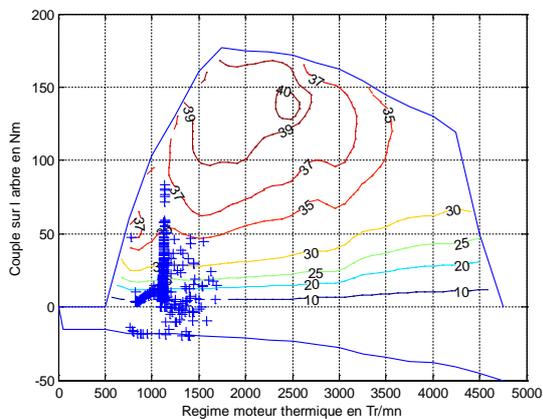


Figure 1-9 : Iso-rendement d'un moteur diesel

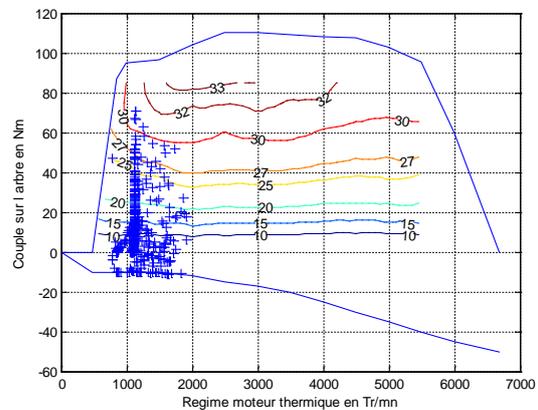


Figure 1-10 : iso-rendement d'un moteur essence

La Figure 1-9 et la Figure 1-10, présentent les iso-valeurs de rendements pour un moteur diesel et un moteur essence tracées dans le domaine total d'utilisation du moteur appelé l'espace couple/vitesse. On peut constater que dans les deux cas, essence ou diesel, le moteur présente ses meilleurs rendements dans la zone d'effort (couple) important (généralement supérieur à  $\frac{3}{4}$  de charge) et des vitesses de rotation pas très élevées. Or, les points d'utilisation sur un circuit urbain relativement congestionné, représentés par les croix sur les graphiques montrent que les moteurs sont utilisés à bas couples et par conséquent dans une zone où ils présentent un mauvais rendement. Dans ce cas précis d'utilisation, le rendement moyen est inférieur à 15 % pour les deux moteurs, ce qui signifie que 85% de l'énergie contenue dans le

carburant est transformée en chaleur principalement à l'échappement, dans le moteur et dans les freins.

#### **1.2.2.4 Les émissions de bruit**

La génération de bruit par les moyens de transport est considérée jusqu'aujourd'hui comme la nuisance la plus ressentie par les personnes exposées (riverains) (Lambert & Philips-Bertin 2009).

Pour les véhicules particuliers, les bruits émis sont principalement de deux natures : le bruit du moteur et le bruit de roulement (dû au contact pneumatiques-chaussée). Généralement le seuil de 50 km est cité pour séparer la zone de prépondérance de chaque type de bruit. En dessous de 50 km/h, c'est généralement le bruit du moteur qui est le plus ressenti. Le bruit de roulement devient de plus en plus prépondérant au dessus de cette vitesse (Hamet et al. 2010).

#### **1.2.2.5 Autres nuisances**

D'autres types de nuisances des moyens de transport sont également à signaler, nous pouvons citer :

- occupation de l'espace : une voiture particulière transportant en moyenne 1,4 personnes en France (Armoogum et al. 2010) a une empreinte au sol de l'ordre de 6 m<sup>2</sup> comparée à quelques dizaines de cm<sup>2</sup> pour un piéton ;

- dégradation du paysage : les infrastructures nécessaires pour l'utilisation des moyens de transport entraînent une intrusion dans les espaces naturels, notamment dans les zones rurales.

### **1.2.3 Les moyens d'actions**

Face à ces différents types de nuisances, dont certaines présentent une nature urgente à l'image de l'émission de gaz à effet de serre, des actions sont en cours ou à entreprendre.

#### **1.2.3.1 Réduction de la mobilité**

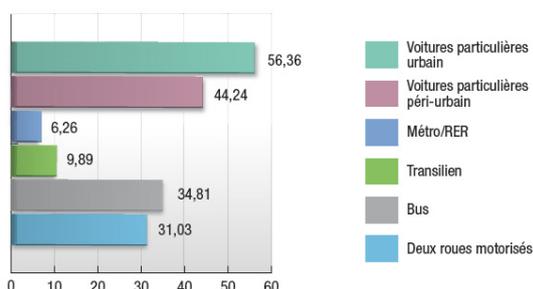
La réduction de la mobilité peut intervenir par deux biais : soit une baisse de la démographie en gardant une mobilité par personne constante, soit une baisse individuelle de la mobilité qui puisse en même temps compenser la croissance démographique. Dans les deux cas, les leviers sont faibles étant donné la disparité des cas dans les différents pays notamment ceux développés et ceux en émergences.

#### **1.2.3.2 Changement de mode et de comportement**

Comme nous l'avons vu plus haut, la voiture particulière génère aujourd'hui la plus grande partie des nuisances dues aux transports. Depuis plusieurs décennies la solution d'une utilisation plus intensive des transports en commun (TC) dans les grandes agglomérations est mise en avant. En effet, mis à part pour les bus dont le taux de remplissage est un facteur déterminant, la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> par personne et par km dans les transports collectifs est nettement plus faible que pour une voiture particulière (Figure 1-12, (ADEME 2009)). En revanche, et au vu des résultats de l'enquête nationale de mobilité (Armoogum et al. 2010) la part de ce mode en France stagne autour de 8% depuis 1990 (Figure 1-2). Le transfert vers les deux roues motorisés et le vélo n'est également pas bien

visible. Un changement de comportement est toujours attendu suite aux prises de conscience environnementale de plus en plus pressantes.

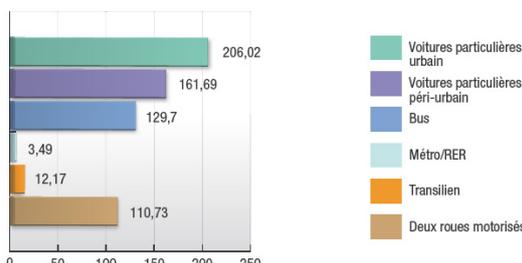
**Efficacité énergétique finale des transports de passagers urbains et périurbains (2005, gep/pass.km\*)**



\* grammes équivalent pétrole par passagers-kilomètres  
Source : ADEME

**Figure 1-11 : Consommation d'énergie par passager sur un km parcouru selon le mode de transport.**

**Efficacité CO<sub>2</sub> des transports de passagers urbains et périurbains (2005, gCO<sub>2</sub>/pass.km\*)<sup>(1)</sup>**



(1) : y compris les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la production d'électricité ou l'extraction, le raffinage et le transport des carburants.  
\* grammes CO<sub>2</sub> par passagers-kilomètres.  
Source : ADEME

**Figure 1-12 : Emission de CO<sub>2</sub> par passager sur un km parcouru selon le mode de transport.**

### 1.2.3.3 Les réponses technologiques

A l'image du succès de la maîtrise des émissions de polluants grâce aux dispositifs de post-traitement, la technologie est attendue pour jouer un rôle important pour diminuer les autres impacts environnementaux des transports.

- Amélioration des technologies existantes : des travaux continuent aujourd'hui pour améliorer d'avantage l'efficacité énergétique et réduire les émissions de polluants des moteurs thermiques. Les moteurs essence pourraient profiter des avancées réalisées jusque là sur le moteur diesel pour réduire l'écart existant.

- Introduction des carburants alternatifs : en plus des carburants à base de Gaz d'origine fossile (GPL, GNV) ou de synthèse (GTL, CTL), les organo-carburants sont présentés aujourd'hui comme une alternative possible pour le futur. Dans la classification donnée dans (Pillot 2010) on trouve : le Biogaz (ou Biométhane), les agro-carburants (huiles végétales, ester d'huile végétales, éthanol) les bio-carburants de différentes générations (huiles végétales hydrogénées, éthanol à base de bio-masse, isobutène microbiologique, biobutanol de fermentation, algo-carburants à base d'algues ...).

- Introduction des motorisations alternatives : ce sont essentiellement les solutions électriques et hybrides qui sont à l'ordre du jour. Les véhicules hybrides, objet de l'essentiel des travaux présentés ici, sont considérés aujourd'hui comme une solution incontournable pour une action à court et moyen terme. La dernière décennie a également vu de grands efforts de recherche dans le domaine des Piles à combustible alimentées par hydrogène. Ces technologies sont en revanche confrontées à plusieurs problèmes tels que le coût, la durée de vie et la production et la distribution de l'hydrogène (C. C. Chan & K. T. Chau 2001), (Mehrddad Ehsani et al. 2005).

### 1.2.3.4 Le cahier des charges pour les moyens de transports futurs

La problématique environnementale engendrée par l'utilisation intensive des carburants fossile impose aujourd'hui de revoir le cahier des charges qui a pendant longtemps donné la priorité aux performances dynamiques, à la sécurité et au confort.

Comme le montre les évolutions de la mobilité en France et en Europe, les tendances sont plutôt à l'intensification de l'utilisation de la voiture individuelle. En plus d'une orientation vers le changement de comportements pour une utilisation plus rationnelle des moyens de transport, rendre les véhicules plus efficaces et moins polluants est une nécessité à court, moyen et long terme.

## ***1.3 Etat de l'art des technologies électriques et hybrides***

### ***1.3.1 Le véhicule électrique : des réponses mais aussi des questions***

Le véhicule électrique a constitué depuis son invention, il y a plus d'un siècle, une alternative envisageable à la mobilité thermique. Conçu au départ pour battre des records de vitesse (la « jamais contente » du Belge Camille Jenatzy a atteint 105 km/h en 1889) il a constitué à partir des années 70 un espoir collectif pour remédier aux problèmes créés par l'utilisation intensive des énergies fossiles. En 1977 on comptait 13 000 véhicules électriques en service au Japon, 30 000 en Grande-Bretagne. En 1979, 2000 voitures électriques sont vendues aux États-Unis (Fréry 2000).

Dans les années 90, la Californie adopte le règlement « Zero Emission Vehicle » qui impose des quotas de véhicules électriques aux principaux constructeurs automobiles à partir de 1998. En 1993 une expérience à La Rochelle, a permis de tester 25 Peugeot 106 et 25 Citroën AX électriques pendant deux ans en utilisation quotidienne (soit plus de 1 million de km parcourus). Depuis 1995, PSA a produit 3 000 et vendu 2 000 de ses 106 et AX électriques (remplacée par la Saxo plus tard) (Fréry 2000), (Chapoulie 1999). En 1996 le plan californien est abandonné en partie, le véhicule électrique retombe petit à petit dans les oubliettes.

Aujourd'hui un nouveau regain d'intérêt est manifesté envers cette technologie principalement pour les raisons suivantes :

- prise de conscience plus importante des problèmes environnementaux ;
- prix fluctuant et pénurie en perspective du pétrole ;
- incitations plus importantes des pouvoirs publics;
- évolution notable des performances des batteries.

Cette dernière raison a été un catalyseur suite à la commercialisation des technologies de batteries à base de Lithium.

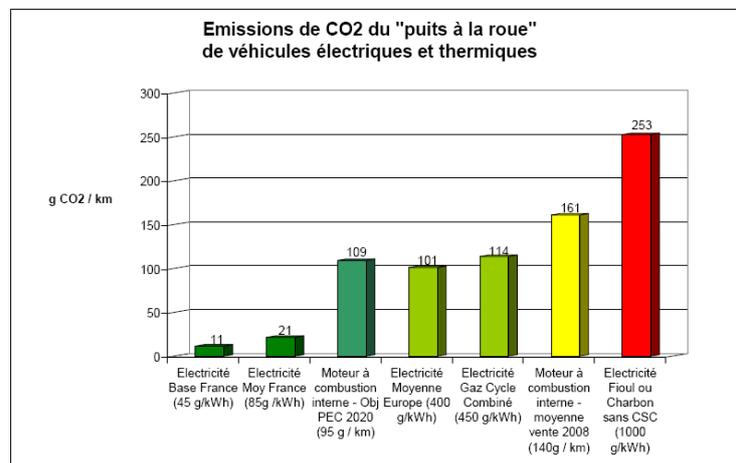
Seulement, malgré ces facteurs, plusieurs verrous d'ordre technologique, économique, écologique et social restent à lever.

- Sur le plan technologique, les progrès réalisés dans le domaine des batteries, notamment celles au Lithium, ont permis d'améliorer l'autonomie pour atteindre plus de 150 km au lieu de 50 à 80 avec des batteries au Plomb ou au NiCd. Cette performance reste en revanche très éloignée de l'autonomie autorisée par les carburants fossiles sur les véhicules thermiques. Les temps de recharge restent également de l'ordre de quelques heures au lieu de 3 minutes pour un plein de carburant.

- Au niveau économique, les batteries les plus performantes actuellement (à base de Lithium) présentent des coûts d'achat supérieurs à 500 €/kWh d'énergie embarquée (Gaines & Cuenca 2000) (certaines sources estiment ce coût à plus de 1000 €) (Schwarz & Gindroz 2005), (Anderson 2009). Un véhicule électrique ayant 150 km d'autonomie a besoin

d'environ 20 kWh et présenterait un surcoût minimum dû à la batterie de l'ordre de 10 000 €. Ces coûts pourraient être réduits par une production de masse mais les incertitudes sur les coûts de la production à grande échelle du lithium ainsi que la complexité des procédés de fabrication tendent à rendre modérée la baisse attendue. Par ailleurs un coût d'investissement important est également nécessaire pour installer des infrastructures de recharge dont des bornes de recharge rapide nécessitant des puissances électriques installées de l'ordre de 40 kW.

- Sur le plan écologique, il est clair que le véhicule électrique apporte une réduction incontestable des émissions de polluants locaux et de bruit. En revanche, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> reste fortement conditionnée par le « mix » de production de l'électricité utilisée pour la recharge des batteries. Dans le cas de la France le « mix » énergétique de production d'électricité est favorable à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> mais avec des risques liés à l'énergie nucléaire. En revanche, quand la production d'électricité est entièrement à base de charbon, le bilan du puits à la roue du véhicule électrique devient critique et peut dépasser les émissions du puits à la roue d'un véhicule thermique comme le montre une étude de l'ADEME (Figure 1-13, (Morchoine & Vidalenc 2009))



Source : ADEME.

**Figure 1-13 : Emission de CO<sub>2</sub> du puits à la roue du véhicule électrique et du véhicule thermique (Morchoine & Vidalenc 2009).**

Il faut tout de même signaler que le bilan du puits à la roue est sensible à plusieurs hypothèses dont la consommation d'énergie au km qui, selon l'usage et les auxiliaires actionnés, peut varier fortement.

Nous reviendrons sur les travaux réalisés et en cours sur l'amélioration des performances du système de stockage de l'énergie du véhicule électrique dans le dernier chapitre.

### **1.3.2 Le Véhicule hybride : origines, définitions et constituants**

#### **1.3.2.1 Origine**

Etant donné les avantages et les inconvénients que présente chacune des deux motorisations, thermique et électrique, l'idée d'associer les deux a donné naissance au véhicule hybride. L'objectif de ce type d'association vise à profiter de l'autonomie apportée par le carburant liquide tout en utilisant la chaîne de traction électrique pour réduire la consommation, les émissions de polluants et le bruit. La recharge de la batterie par le moteur

thermique permettrait d'augmenter le couple du moteur thermique pour fonctionner dans des zones de meilleurs rendements. Nous reviendrons plus en détail sur ces différents aspects.

A noter que ce concept d'hybridation n'est pas récent mais date du fin du 19<sup>ème</sup> siècle. En effet en 1898, Ferdinand Porsche ajouta un groupe électrogène à sa voiture électrique avec des moteurs dans les roues pour réaliser le premier véhicule hybride de l'histoire. Depuis, les tentatives se sont succédées et plusieurs centaines de prototypes ont été développés mais n'ont jamais vu le jour sur les marchés de l'automobile. Il a fallu attendre 1997 pour que le premier véhicule hybride soit disponible sur le marché Japonais puis en 2002 sur le marché Européen avec la Prius de Toyota.

### **1.3.2.2 Définition**

Il n'existe pas de consensus aujourd'hui sur une définition exacte du véhicule hybride. La définition la plus basique le présente comme un véhicule possédant au moins deux sources d'énergie (François Badin 1997). C'est sur la nature de ces sources et sur leurs utilisations que les définitions divergent. Certains auteurs (Sébastien Delprat 2002), (Kermani 2009) émettent une seule condition supplémentaire qui consiste à imposer à l'une au moins des sources d'être réversible. Scordia (Julien Scordia 2004) considère que cette restriction est insuffisante puisqu'un véhicule thermique dispose déjà de deux sources si l'on prend en compte la batterie de démarrage qui est un élément réversible. Il introduit alors, à l'instar d'autres auteurs (A. Emadi et al. 2005), la notion de la participation de la source au mouvement du véhicule. Cette définition correspond mieux à l'origine de l'idée d'hybridation qui partait de l'association de deux chaînes de traction de nature différentes. En revanche, elle exclue de ce fait le véhicule thermique ayant juste la fonction « Stop/start » communément admis comme étant « un micro-hybride ». Cet aspect de fonctionnalité introduite par l'hybridation peut être également utilisé pour définir et hiérarchiser différents véhicules. Nous reviendrons sur ces fonctions plus en détail lors des différentes classifications des véhicules hybrides thermique- électrique.

Une autre vision que nous proposons ici permettrait de concilier les différentes définitions tout en suggérant une démarche structurée pour l'étayer. En effet, partant du fait que le véhicule conventionnel dispose déjà de deux sources, nous suggérons que l'hybridation représente une philosophie ou une démarche et non une juxtaposition de sources. Cette démarche commence quand on commence à vouloir gérer les sources pour un objectif précis comme la réduction de la consommation ou des émissions de polluants. Ainsi le micro-hybride apparaît naturellement comme le début de l'hybridation par l'introduction de la première fonction de gestion de l'énergie qui est le « stop/start ». Ensuite, le processus de l'hybridation peut s'amplifier comme suit :

- 1- on change la taille des composants
- 2- on change l'architecture de la chaîne de traction
- 3- on change la nature et la complexité des sources

Ce dernier aspect peut amener à ce qu'on appelle une hybridation des sources. En effet, une source peut être constituée par une association de sources de même nature (délivrant le même type d'énergie). Tel est le cas par exemple pour les batteries d'accumulateurs et les super-condensateurs. Allègre (Anne Laure Allègre 2010) propose dans ce cas la dénomination de véhicule mixte ou à stockage mixte à la place de stockage hybride proposé par la littérature anglophones. Ainsi, un véhicule hybride thermique électrique ayant la source électrique

constituée de l'association de batteries et de supercondensateur serait appelé véhicule hybride mixte.

### 1.3.2.3 Le véhicule hybride thermique-électrique VHTE

Le véhicule hybride thermique électrique (Hybrid Electric Vehicle : HEV, en anglais) est un cas particulier du véhicule hybride générique selon la définition ci dessus. Il est constitué de deux sources d'énergie : un carburant fossile (généralement essence ou diesel) et un accumulateur électrochimique (batterie ou supercondensateur). Pour une simplification des représentations, nous allons dorénavant associer le carburant et son transformateur, le moteur thermique (MT), en faisant l'hypothèse que le carburant n'est pas utilisé autrement que par ce biais. (Figure 1-14).

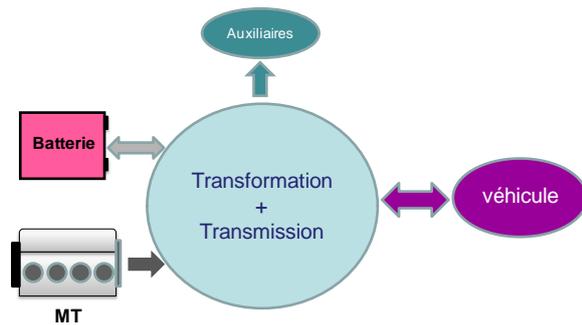


Figure 1-14 : Schéma général du VHTE

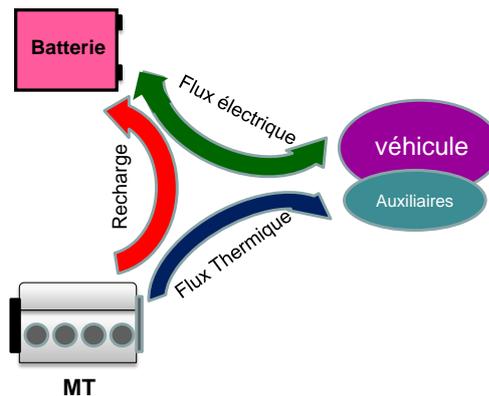


Figure 1-15 : Flux d'énergie dans le VHTE

Le couplage entre les deux sources d'énergie (transformation + transmission) peut être réalisé de plusieurs façons et donnent lieu à différentes architectures de la chaîne de traction. Quelle que soit cette architecture, les différents flux d'énergie peuvent se réduire à trois principaux (Figure 1-15) :

- flux électrique : énergie fournie ou récupérée par la batterie,
- flux Thermo-mécanique : énergie fournie par le moteur thermique pour la traction et les auxiliaires,
- recharge : énergie fournie par le moteur thermique pour recharger la batterie.

Ces trois flux peuvent ensuite se décliner en fonctionnalités liées directement ou indirectement à l'hybridation :

- Le stop/start : c'est la fonction qui permet d'arrêter le moteur thermique à l'arrêt du véhicule et le redémarrer pendant la traction ou pour tout autre besoin<sup>7</sup> ;
- Le mode tout électrique : le mouvement du véhicule est assuré uniquement par l'énergie fournie par la batterie, le moteur thermique étant éteint ;

<sup>7</sup> Pour des raisons d'échauffement nécessaire du moteur et des catalyseurs, de faible charge de la batterie ou pour alimenter un auxiliaire en prise direct sur le vilebrequin moteur, ce dernier peut être amené à être démarré à l'arrêt du véhicule.

- L'assistance électrique : la batterie participe au mouvement du véhicule en même temps que le moteur thermique ;

- La récupération de l'énergie au freinage : pendant les phases de décélération, l'énergie cinétique du véhicule ou une partie est renvoyée dans les batteries ;

- La recharge de la batterie par le moteur thermique : cette fonction est semblable à la fonction de base existant sur un véhicule thermique utilisant un alternateur. Elle permet de maintenir l'état de charge de la batterie pour éviter les décharges profondes ;

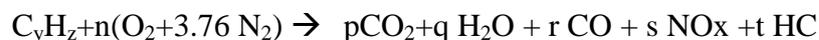
Comme nous le verrons par la suite, certaines de ces fonctions sont accessibles par certains types d'agencement des composants et d'autres pas.

#### **1.3.2.4 Les composants du véhicule hybride thermique-électrique**

Dans cette partie nous décrirons plus en détail les éléments utilisés dans un VHTE, objet des principaux travaux exposés dans ce mémoire.

##### **1.3.2.4.1 1- Le moteur thermique**

Le moteur à combustion (ou à explosion) ou encore moteur thermique est le siège d'une réaction de combustion entre un mélange de gaz constitué d'oxygène (provenant de l'air) et de vapeur d'hydrocarbure. Une compression de ce gaz entraîne sa montée en température et une explosion spontanée ou provoquée par une étincelle. On parle dans ce dernier cas d'allumage commandé. La réaction de combustion peut être écrite d'une manière générique comme suit :



( $C_yH_z$  étant la formule chimique de l'hydrocarbure utilisé)

Les dérivés de cette réaction sont envoyés dans un circuit d'échappement constitué de catalyseur, de silencieux et de filtre à particules de plus en plus généralisé sur les véhicules à moteurs diesel.

La transformation en énergie mécanique repose sur le cycle thermodynamique à deux ou quatre temps (Affleck et al. 1977).

Les moteurs à combustion interne à allumage commandé sont principalement les moteurs utilisant l'essence, le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) et le Gaz Naturel Véhicule (GNV). Les moteurs diesel sont en revanche à allumage spontané mais utilisent une bougie pour le préchauffage.

Les moteurs diesel ont réalisé des progrès considérables ces dernières années. Portés par un avantage énergétique intrinsèque dû à une densité du gasoil environ 13% plus grande que celle de l'essence pour un pouvoir calorifique sensiblement égal (voir Tableau 1-2), ils ont bénéficié en Europe de recherches intensives aboutissant à une amélioration des performances dynamiques à cylindrée égale, ainsi qu'à une efficacité et une dépollution sensiblement augmentées. Il faut signaler qu'aux Etats Unis et au Japon, les moteurs diesel sont très marginalement utilisés, principalement à cause de leurs émissions de  $NO_x$  et de particules.

Tableau 1-2 : Comparaison des moteurs essence et des moteurs diesel

	Moteur Essence	Moteur Diesel
Densité carburant	~750 g/l	~850 g/l
Pouvoir calorifique	46.4 MJ/kg	45.6 MJ/kg
Prix relatif du carburant *	1	0.8
Allumage	Commandé	Spontané
Taux de compression <sup>8</sup>	10-13	16-20
Richesse <sup>9</sup> des gaz	Généralement=1	>1
Norme Euro 5 : NOx (g/km)	60	180
Norme Euro5 : particules (g/km)	5	5
Rendement maxi	~ 33 %	~40%
Prix relatif du moteur	1	~1.2

\* La différence de prix est en évolution tendant à rapprocher les deux carburants

Parmi les dispositifs contribuant aux avancées du moteur diesel on peut citer les suivants :

- Les rampes d'injection commune (commun rail) : ce type de dispositif permet d'avoir une injection directe à haute pression (1200 à 2000 bar) ce qui a pour effet d'obtenir un meilleur mélange dû à l'atomisation du carburant et une meilleure précision de la quantité injectée et de l'instant d'injection.

- La suralimentation en air : cette opération peut être réalisée par un turbocompresseur qui permet de comprimer l'air à l'admission et augmenter ainsi sa densité qui a pour effet l'augmentation de la puissance du véhicule à cylindrée égale. La densité de l'air peut être également augmentée par un refroidissement en utilisant un échangeur thermique.

- La recirculation des gaz d'échappement (EGR : Exhaust Gas Recirculation) : cette opération a pour effet de réduire les émissions de NO<sub>x</sub> par réduction de la température de la flamme en augmentant la capacité calorifique du mélange présent dans le cylindre.

Certaines de ces avancées sont en train d'être transposées aux moteurs essences.

Certains moteurs essence utilisent des cycles thermodynamiques spécifiques comme le cycle Atkinson-Miller (Julien Scordia 2004). Ce cycle permet de diminuer les pertes de pompage en optimisant la quantité d'air comprimé en fonction de la charge. Un tel moteur possède un bon rendement mais nécessite une cylindrée plus importante à puissance égale. Le

<sup>8</sup> (Volume du cylindre+Volume de la chambre de combustion)/Volume de la chambre de combustion

<sup>9</sup> Représente le rapport air-carburant dans le mélange en combustion. Un mélange stœchiométrique possède une richesse de 1.

véhicule hybride Prius de Toyota est équipé d'un moteur Atkinson-Miller et profite de la puissance électrique installée pour remédier au manque de puissance intrinsèque du moteur.

#### **1.3.2.4.2 Les batteries**

Le terme batterie est un abus de langage utilisé pour désigner le plus souvent un assemblage d'élément d'accumulateur électrochimique. L'accumulateur élémentaire est représenté par un couple électrochimique dont la constitution des électrodes et de l'électrolyte fixe le potentiel de base (tension à vide) et dont la quantité de matière active conditionne directement la capacité coulométrique. Contrairement à l'appellation « pile », les batteries possèdent la caractéristique de réversibilité qui permet de les recharger suite aux réactions chimiques inverses de celles se déroulant pendant la décharge.

Les critères pour évaluer une batterie utilisée dans la traction électrique ou hybride sont généralement les suivants :

- La puissance massique quantifie la puissance maximale délivrable par la batterie selon la masse embarquée. Cette variable est spécialement importante pour les applications hybrides.

- L'énergie massique représente la quantité d'énergie qu'il est possible d'embarquer dans le véhicule par unité de masse. Plus cette énergie est importante, plus l'autonomie augmente à masse égale. Pour un véhicule électrique ceci constitue un des critères les plus importants.

- La puissance volumique conditionne la puissance de batterie embarquable à encombrement donné.

- L'énergie volumique représente l'énergie qu'il est possible d'embarquer dans le véhicule à volume donné.

- Le rendement de la batterie est un paramètre important pour l'efficacité énergétique de la chaîne de traction.

- La recyclabilité : les composants de la batterie, notamment les substances chimiques représentent un danger environnemental en cas de non maîtrise des déchets. Le taux de recyclabilité d'une batterie est aujourd'hui un paramètre clé pour son acceptabilité.

- La durée de vie ou l'aptitude à la cyclabilité est un paramètre primordial dans les véhicules hybrides. Un échange de batterie impacte le prix global d'utilisation du véhicule et nécessite un recyclage supplémentaire qui peut être générateur de nuisances environnementales.

- Le prix des composants dans les applications automobiles représente un critère important. La batterie est un composant sensible de ce point de vue étant donnée le prix au kWh des technologies les plus avancées (voir Tableau 1-3).

Le Tableau 1-3 résume certaines caractéristiques des couples électrochimiques usuels utilisés dans la traction électrique et hybride (Schwarz & Gindroz 2005).

**Tableau 1-3 : Caractéristiques de couples électrochimiques usuels pour véhicules électriques et hybrides (Schwarz & Gindroz 2005)**

	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	ZEBRA	Li phosphate	Li ion	Li polymère
Energie spécifique (Wh/kg)*	30-50	45-80	60-110	120	120-140	150-190	150-190
Densité d'énergie (Wh/litre)*	75-120	80-150	220-330	180	190-220	220-330	220-330
Puissance en pointe (W/kg)	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	200	Jusqu'à 800	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Nombre de cycle (charge/décharge)	400-600(1) 1200(2)	2000	1500	800	>2000	500-1000	200-300
Autodécharge par mois	5%	20%	30%	12 % par jour	5%	10%	10%
Tension nominale d'un élément	2V	1,2V	1,2V	2,6 V	3,2V	3,6V	3,7V
Gamme de température de fonctionnement	-20°C à 60°C	-40°C à 60°C	-20°C à 60°C	- 40°C à 50°C	0°C à 45°C (charge) -20°C à 60°C (décharge)	-20°C à 60°C	0°C à 60°C
Avantages	Faible coût	Fiabilité  Performances à froid	Très bonne densité d'énergie	Très bonne densité d'énergie  Bonne cyclabilité	Très bonne densité d'énergie, sécurité, coût, cyclabilité	Excellente énergie et puissance	Batteries minces possibles
Inconvénients	Faible énergie  Mort subite	Relativement basse énergie  Toxicité	Coût des matériaux de base  Comportement en température	Puissance limitée  Auto-consommation	Charge à basse T°	Sécurité des gros éléments  Coût	Performances à froid  Coût
Coûts Indicatifs <sup>(3)</sup> (€/kWh)	200 à 250 <sup>(1)</sup>  200 <sup>(2)</sup>	600	1500 à 2000	800 à 900	1000 à 1800	2000	1500 à 2000

\* Les chiffres extrêmes des fourchettes correspondent à des tailles différentes d'éléments (les gros éléments ayant en général des énergies plus élevées) ou à des conceptions pour des applications différentes.

(1) étanche; (2) tubulaire ; (3) pour les volumes actuels de production

Les plages d'incertitude pour un couple électrochimique donné peuvent provenir de plusieurs facteurs comme la taille des éléments, la qualité des matériaux ainsi que la qualité du procédé de fabrication.

#### 1.3.2.4.3 La machine électrique

La machine électrique est un convertisseur électromécanique qui, en fonctionnement moteur, développe un couple sur son arbre à partir d'alimentation électrique de ses bobinages. En fonctionnement générateur, il permet de régénérer du courant vers une charge (batterie par exemple) en appliquant un couple de freinage. Plusieurs types de moteurs électriques existent, les plus utilisés dans la traction électrique sont les moteurs à courant continu, les moteurs asynchrone, les moteurs synchrone à aimant permanent ou à rotor bobiné. Le moteur à réluctance variable a suscité un grand intérêt ces dernières décennies pour sa simplicité et son faible coût mais son application dans le transport n'a pas encore abouti à cause principalement

de problème de bruit et de vibration. Le moteur à courant continu qui a équipé les premiers véhicules électriques particuliers et de transport en commun est aujourd'hui écarté. Les avantages qu'il présentait en termes de simplicité de commande de par la nature de la tension continue des batteries sont largement compromis par une puissance massique et volumique défavorable, un rendement énergétique plus faible que ses concurrents et un système d'alimentation électrique basé sur le principe de collecteurs/balai nécessitant une maintenance. L'évolution de l'électronique de puissance et de commande (Caron & Hautier 1995) (voir § suivant) a également rendu obsolète l'avantage du moteur à courant continu avec la généralisation des onduleurs et de la commande vectorielle.

Comme pour les batteries, les critères de choix des moteurs électriques correspondent à un cahier des charges exigeant en termes de poids, de volume, d'efficacité énergétique et de coût d'achat et d'entretien, se déclinant en puissance massique, puissance volumique, rendement, maintenance et prix du moteur électrique.

Même si à technologie donnée, la qualité des matériaux, le procédé de fabrication, ainsi que l'adéquation du dimensionnement à l'application influent considérablement sur les critères de choix, une tentative de classification de ces technologies est donnée sur le tableau Tableau 1-4 (Rochdi Trigui 1997).

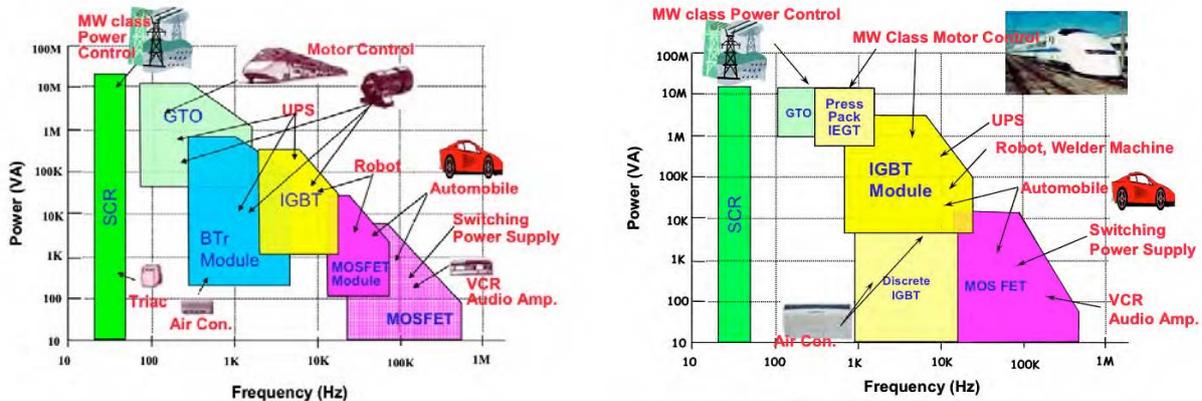
**Tableau 1-4 : comparaison des technologies usuelles de moteur électrique**

	<b>asynchrone</b>	<b>Synchrone à aimant permanent</b>	<b>Synchrone à rotor bobiné</b>
Construction	Simple	Assez complexe	Complexe
Puissance massique et volumique	Bonne	excellente	moyenne
Rendement	Bon	Très bon	Bon
Fonctionnement à grande vitesse	Excellent	moyen	Bon
Entretien	Inutile	Inutile	Utile
Fiabilité	Excellente	Bonne	Bonne
Coût	Assez faible	grand	Assez grand

#### **1.3.2.4.4 L'électronique de puissance**

L'électronique de puissance est constituée principalement de semi-conducteurs jouant le rôle d'interrupteurs opérant à relativement haute fréquence (1 à quelques dizaines de kHz) ainsi que de composants passifs pour le filtrage et l'aide à la commutation. Les convertisseurs statiques réalisés à base de ces composants ont pour objectif de transformer l'énergie électrique en entrée en énergie électrique en sortie avec un coefficient de transformation agissant sur les tensions et les courants. Si la transformation est de type continu/ continu, on parle de hacheur pour le convertisseur. Si la transformation est de type continu/ alternatif, on

parle d'onduleur. C'est ce type de convertisseur qui est utilisé pour passer de la tension continue de la batterie à une tension triphasée alternative pour alimenter les moteurs de type asynchrone ou synchrone. La Figure 1-16 (Nakagawa et al. 2008) représente les différents composants de puissance et leur répartition dans le domaine puissance/fréquence ainsi que l'évolution de cette répartition entre 1997 (Figure 1-16 a)) et 2005 (Figure 1-16 b)).



a) Domaines d'utilisation en 1997

b) Domaines d'utilisation en 2005

Figure 1-16 : Domaine d'utilisation des interrupteurs de puissance

Dans le domaine du véhicule hybride, selon le niveau de tension c'est les MOSFET (basse tension 12 à 42V) et les IGBT (haute tension) qui sont les plus utilisés. Une grande évolution allant dans le sens de l'intégration des convertisseurs est visible aujourd'hui (Beretta 2005). En 1997, l'électronique de puissance du véhicule Prius de Toyota étaient déjà disposée dans deux socles chacun intégrant la totalité d'un onduleur pour chacune des machines électriques (R. Trigui et al. 2003).

Les fréquences de commutation (des interrupteurs de puissance) sont généralement un compromis entre la qualité du courant désiré (différents harmoniques), les performances intrinsèques des composants ainsi que le rendement conditionné par les pertes par commutation. Dans certains véhicules hybrides testés, des fréquences de 5 à 7 kHz ont été observées (R. Trigui et al. 2003).

#### 1.3.2.4.5 La transmission mécanique

La transmission mécanique est un convertisseur de type mécanique/mécanique où les couples et les vitesses après transformation sont, au rendement de transmission près, une combinaison linéaire des couples et vitesses avant transformation. Nous citons ici les composants les plus utilisés dans les véhicules hybrides.

##### 1- Le réducteur (ou coupleur)

Constitué d'engrenage ou de courroie avec des poulies à diamètre fixe, ce composant permet de relier deux arbres avec un coefficient de réduction proportionnel au rapport des rayons des engrenages ou des poulies.

##### 2- La boîte de vitesse

Constituée de plusieurs engrenages, elle permet d'avoir plusieurs coefficients de réduction selon les engrenages engagés. Historiquement le nombre de rapport est en augmentation.

Aujourd'hui les véhicules sont majoritairement avec boîte à 5 rapports, la tendance étant vers la généralisation des boîtes à 6 rapports.

On peut distinguer :

- Les boîtes manuelles : actionnées manuellement avec l'aide d'un dispositif d'embrayage commandé également par le conducteur, et qui permet de déconnecter le moteur thermique pendant les phases de changements de rapport.

- Les boîtes robotisées : les rapports sont passés manuellement ou automatiquement, le processus d'embrayage est quant à lui complètement automatisé.

- Les boîtes automatiques : dans ce cas les seules commandes offertes au conducteur sont la sélection du mode traction ; avant, arrière ou neutre.

### 3- Le différentiel

Ce composant mécanique placé sur l'essieu moteur possède une entrée pour recevoir l'arbre du moteur (ou de sortie de boîte) et deux sorties, une vers chaque roue. Il permet une double fonction : réaliser une réduction de vitesse entre l'entrée et les sorties et permettre une rotation différente des deux roues du même essieu pendant les virages.

### 4 - Le train épicycloïdal

Le train épicycloïdal, ou train planétaire est un dispositif mécanique permettant de relier trois arbres en rotation. Il est constitué d'une couronne reliée à un des arbres, dans laquelle tourne un dispositif appelé porte satellite. Ce dernier est constitué de plusieurs pignons reliés à un des arbres et pouvant tourner librement ou en entraînant la couronne s'ils sont partiellement ou entièrement bloqués. Le dernier arbre est relié à un engrenage central appelé soleil et qui permet de faire tourner la couronne si le porte satellite est bloqué ou le porte satellite si la couronne est bloquée. Une rotation conjointe des trois arbres est possible et obéit à la relation linéaire de Willis.

### 5 - La transmission continument variable (CVT)

Composée généralement de poulies à diamètre variables au primaire et/ou au secondaire et d'une courroie (parfois métallique), la transmission continument variable permet de balayer une large plage de vitesse du moteur thermique à vitesse de véhicule donnée. Pour la variation du diamètre de la poulie, deux plateaux sont généralement comprimés l'un contre l'autre pour faire glisser la courroie en haut de la gorge trapézoïdale. Pour réaliser l'opération de compression, un compresseur entraîné par un moteur électrique ou par le moteur thermique est utilisé. La consommation du compresseur constitue un élément défavorable dans le bilan énergétique de ce type de transmission.

## 1.4 Classification des hybrides thermiques-électriques

### 1.4.1 Classification des VHTE selon la topologie

Le couplage réalisant la transformation puis la transmission de l'énergie à partir des deux sources vers les roues peut être assuré par plusieurs dispositifs. Trois grandes familles d'agencements sont universellement connues aujourd'hui (Chan C. C. & Chau K. T. 2001), (Mehrdad Ehsani et al. 2005), (A. Emadi et al. 2005) (Beretta & Collectif 2007).

#### 1.4.1.1 L'hybridation série

Sur une base de véhicule électrique avec des batteries et un ou plusieurs moteurs électriques, un moteur thermique associé à un générateur électrique est ajouté sur le bus continu des batteries. Ainsi la liaison entre les deux sources d'énergie est de type électrique (nœud de puissance au niveau du bus continu). La génération d'électricité peut alimenter le ou les moteurs de traction, recharger la batterie ou les deux fonctions simultanément (Figure 1-16).

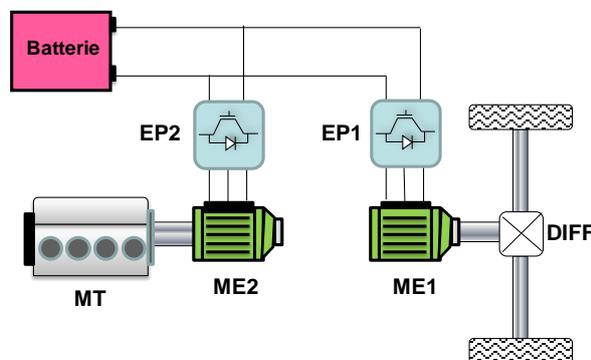


Figure 1-17 : Chaîne de traction hybride série

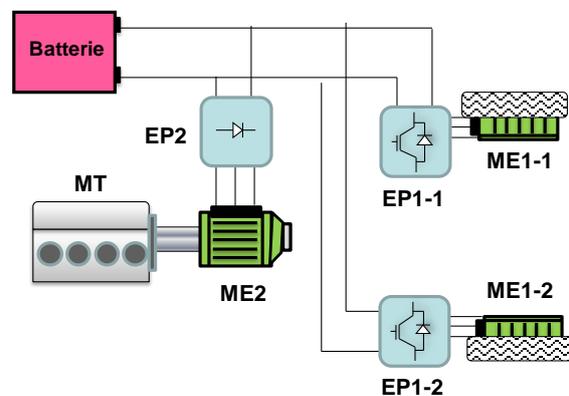


Figure 1-18 : Chaîne de traction hybride série avec moteurs dans les roues.

Peu de véhicules particuliers utilisent cette configuration hybride, le plus connu est le Chevrolet volt vendu aux Etats Unis depuis fin 2010 (Wikipedia 2011). Plusieurs prototypes représentant des véhicules électriques avec prolongateurs d'autonomie sont en cours de commercialisation et peuvent être considérés comme des hybrides séries à dominante électrique (Valeo, 2011). En revanche, dans les transports en commun cette architecture a été bien utilisée à l'image de plusieurs bus de Wright Group roulant à Londres depuis 2005 (Wrightbus 2011) et encore, moins récent, les Nova Bus de Lockheed Martin circulant à New York depuis 1998 (Lockheedmartin 2011). Le microbus de Gruau, premier véhicule hybride rechargeable vendu en France était également de type hybride série mais sa production est stoppée (Majed Boujelben 2009).

Avantages - Le principal avantage de cette configuration est qu'elle permet le découplage total entre la vitesse du véhicule et la vitesse du moteur thermique. Ainsi ce dernier peut être sollicité sur ses meilleurs points de fonctionnement en termes de rendement avec une maîtrise de la dynamique qui permet de limiter les émissions transitoires de polluants. Un autre avantage est la simplicité de commande de ce type de véhicule. Dans la configuration de moteurs électriques dans ou proches des roues (Figure 1-17), l'architecture hybride série permet d'avoir un plancher bas (de par l'absence d'essieu), avantage indéniable pour des véhicules de transport en commun pour une accessibilité plus facile de personnes à mobilité

réduite. Certaines applications de véhicule électrique avec un groupe électrogène de puissance réduite permettant une prolongation d'autonomie ou d'assurer un service minimum (mode dégradé) en cas de panne profite également de cette configuration. C'est le cas des trolleybus CITADIS (Fabrication IRISBUS avec chaîne de traction ALSTOM) de la ville de Lyon qui dispose de groupe électrogène à puissance réduite pour pouvoir rejoindre le dépôt en cas de problème d'alimentation électrique.

Inconvénients - Le principal inconvénient de la configuration hybride série est la cascade de pertes que doit concéder le flux d'énergie fournie par le moteur thermique pour arriver aux roues. Dans le cas d'utilisation du moteur thermique sur ses meilleurs points de rendement, le mode recharge de la batterie risque d'être fréquent (notamment dans le cas d'un groupe électrogène de taille conséquente). Dans ce cas, l'énergie provenant du moteur thermique est stockée dans la batterie avant son utilisation par le moteur de traction, ce qui rajoute des pertes supplémentaires. Un autre inconvénient réside dans l'utilisation de deux moteurs électriques avec leurs convertisseurs associés, ce qui augmente le coût de l'hybridation.

### 1.4.1.2 L'hybridation parallèle

Dans la configuration hybride parallèle, la liaison entre les deux flux d'énergie provenant des deux sources est réalisée d'une façon mécanique. Après une transformation électromécanique de l'énergie provenant des batteries, un couplage à l'arbre du moteur thermique permet d'additionner les couples des deux moteurs. Ce couplage peut se réaliser à différent niveau de la transmission conduisant à différentes configurations :

1- l'hybride parallèle à un embrayage :

Cette catégorie d'hybride parallèle peut être déclinée elle-même en plusieurs configurations selon la position du moteur électrique dans la transmission.

\* La première possibilité est de coupler en amont de l'embrayage l'arbre du moteur électrique à l'arbre du moteur thermique soit en montage direct sur cet arbre soit via un réducteur mécanique (engrenage ou courroie) (Figure 1-18).

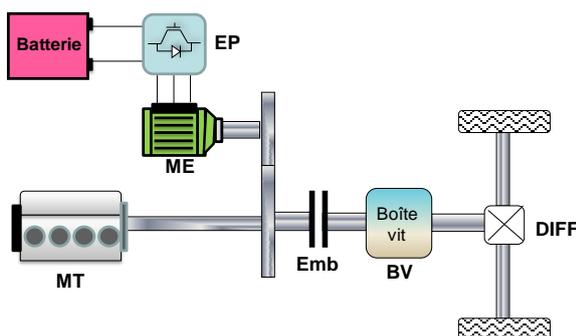


Figure 1-19 : Chaîne de traction hybride parallèle à un embrayage avec moteur électrique amont embrayage

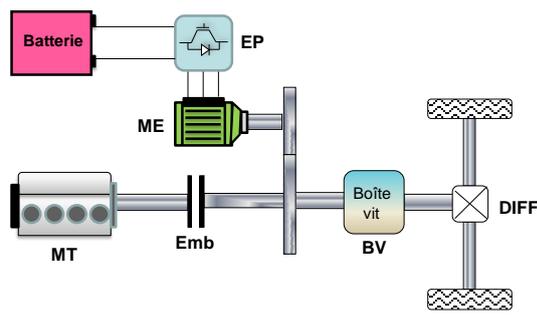


Figure 1-20 : Chaîne de traction hybride parallèle à un embrayage avec moteur électrique sur le primaire de la boîte de vitesses

Dans cette configuration, la seule fonction de l'hybridation difficile à réaliser est le fonctionnement en mode tout électrique en traction comme en freinage. Pendant ce mode, le moteur électrique doit assurer, en plus du mouvement du véhicule, la rotation du moteur thermique non alimenté. Cette rotation s'accompagne de pertes mécaniques et pneumatiques rendant ce mode peu efficace. Une possibilité de réduire ces pertes pour rendre ce mode plus

compétitif consiste à réaliser une gestion intelligente des soupapes pour diminuer les pertes par pompage.

Parmi les véhicules utilisant cette architecture nous pouvons citer l'Insight de Honda commercialisé depuis 1999. L'architecture de la chaîne de traction de ce véhicule utilise une machine électrique discoïde en lieu et place du volant d'inertie. Toutes les réalisations à base d'alternodémarreur séparé (utilisant l'emplacement de l'alternateur conventionnel) sont aussi des hybrides parallèles avec machine électrique en amont de l'embrayage comme la Toyota Crown, la Citroën C3 et la GM Saturn.

\* La deuxième configuration permet le couplage mécanique du moteur électrique en aval de l'embrayage en entrée de la boîte de vitesse (Figure 1-19). Dans ce cas, un « véritable » mode tout électrique est possible pendant l'ouverture de l'embrayage. En revanche, un problème de gestion du démarrage du moteur thermique peut survenir selon les capacités du moteur électrique et de la batterie. En effet, ce démarrage ne peut se faire qu'en roulage ou en mode neutre de la boîte. Pendant le roulage, le moteur électrique doit fournir un couple supplémentaire pour réaliser le démarrage, sinon la puissance nécessaire sera prélevée sur celle fournie pour la traction du véhicule entraînant un démarrage inertiel. Cette dernière option n'est pas toujours souhaitable pour des raisons d'agrément de conduite. Dans le cas où le mode neutre est commandable par la loi de gestion du véhicule (ce n'est pas le cas pour les boîtes manuelles) il est possible de passer par ce mode pour réaliser le démarrage à l'arrêt du véhicule ou en roulage. Dans ce dernier cas, il y a une perte de motricité transitoire pendant la phase de démarrage. Une solution plus efficace mais aussi plus coûteuse pour résoudre ce problème est l'ajout d'un démarreur renforcé ou d'un alerno-démarreur séparé pour assurer la fonction démarrage.

Parmi les réalisations arrivées à un stade de pré-commercialisation mais arrêtées ensuite et qui utilisent cette configuration de chaîne de traction sont la Peugeot 308 et la Citroën C4 hybrides (Caradisiac 2011). La machine électrique sous forme discoïde remplace, comme dans le cas de l'Insight, le volant d'inertie sauf que l'embrayage est intercalé cette fois entre le moteur thermique et la machine électrique. Un prototype réalisé en 1999 au LAMIH en collaboration avec PSA est basé également sur cette configuration (Sébastien Delprat 2002). Dans le domaine des véhicules lourds, Volvo trucks a mis en petite série son camion hybride urbain avec une architecture semblable à celle de PSA 308 et C4.

\* La troisième configuration réalise le couplage mécanique du moteur électrique à la sortie de la boîte de vitesse (Figure 1-20). Dans ce cas le moteur électrique doit disposer, à même puissance, de couple plus élevé et une plage de vitesse de rotation plus restreinte compatible avec la vitesse en entrée du différentiel. Une option possible de cette configuration consiste à déporter les moteurs électriques vers les roues avec ou sans démultiplication. Le même problème de démarrage du moteur thermique que la configuration précédente se pose avec seule l'option du démarrage inertiel qui est possible. Il est préférable dans ce cas de rajouter un démarreur dédié.

Il n'existe pas à notre connaissance de véhicule hybride commercialisé ayant cette configuration. En revanche, le véhicule prototype Flex Hybrid de l'IFPEN utilise un moteur électrique connecté en fin d'arbre primaire de la boîte. Il est de ce fait une combinaison entre les deux configurations amont et aval boîte.

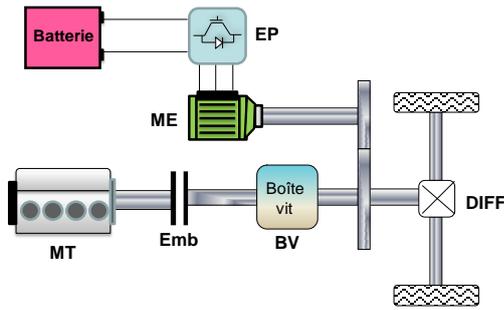


Figure 1-21 : Chaîne de traction hybride parallèle à un embrayage avec moteur électrique en aval de la boîte de vitesse

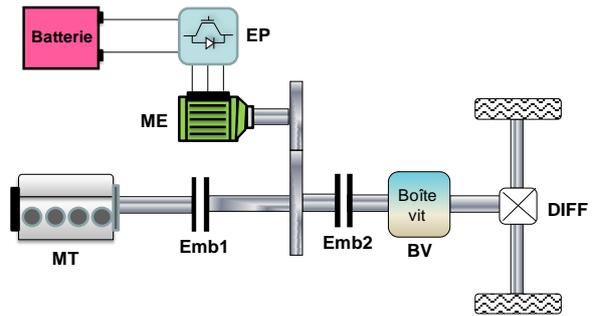


Figure 1-22 : Chaîne de traction hybride parallèle à deux embrayages

## 2 - l'hybride parallèle à deux embrayages :

Le couplage du moteur thermique et du moteur électrique est semblable au cas du véhicule hybride parallèle à 1 embrayage avec moteur électrique en amont de l'embrayage (emb2 sur la Figure 1-21). La seule différence est l'introduction d'un embrayage supplémentaire entre les deux moteurs (emb1). Lors de son ouverture, cet embrayage permet d'avoir un mode électrique avec un moteur thermique à l'arrêt. Le deuxième embrayage, en plus de sa fonction usuelle qui est le changement de rapport de boîte, permet pendant son ouverture la réalisation du démarrage et d'une recharge éventuelle de la batterie à l'arrêt du véhicule. Une gestion rapide et efficace des deux embrayages permettrait d'éviter le démarrage inertiel et d'économiser un démarreur additionnel.

L'Infiniti M35 hybrid prévu d'être commercialisé en 2011 est un véhicule hybride à deux embrayages (Cartech 2011).

3 - l'hybride parallèle par la route Figure 1-22 : le moteur électrique est couplé directement ou via un réducteur mécanique à un différentiel de l'essieu arrière du véhicule (ou sur l'essieu avant si le moteur thermique est sur l'essieu arrière). L'hybridation est réalisée dans ce cas, comme son nom l'indique, à travers les quatre roues motrices et la route. Les deux moteurs peuvent participer individuellement ou conjointement à l'avancement du véhicule. Le mode tout électrique, y compris en freinage, est possible avec le moteur thermique arrêté et la boîte de vitesse en mode neutre (ou point mort). Une variante de cette architecture, appelée double parallèle (Letrouve et al. 2009) utilise un alerno-démarrreur pour l'arrêt démarrage du moteur thermique et permet d'éviter l'utilisation d'un démarrage inertiel et d'une recharge de la batterie par la route (flux énergétique correspondant à la recharge de la batterie par le moteur thermique) Figure 1-23.

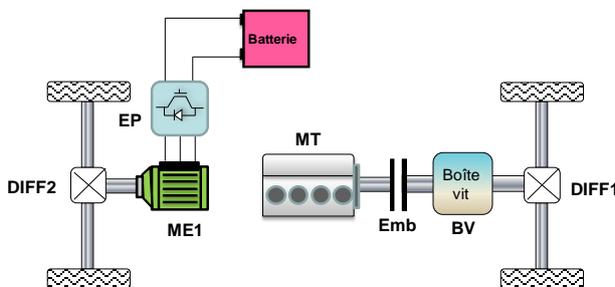


Figure 1-23 : Chaîne de traction hybride parallèle par la route

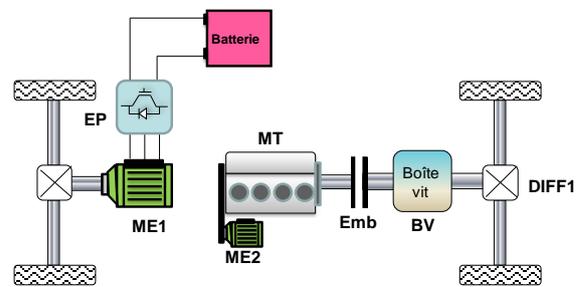


Figure 1-24 : Chaîne de traction hybride double parallèle

Le véhicule 3008 Prologue hybride de PSA annoncé pour une commercialisation en 2011 est un véhicule double parallèle par la route (PSA 2011).

Avantages des architectures hybrides parallèles - Le principal avantage de l'hybride parallèle avec ses différentes sous familles est sa configuration proche du véhicule thermique conventionnel. En effet, certaines architectures parallèles nécessitent peu de modification de la chaîne cinématique usuelle. Dans le cas d'un alternodémarrreur intégré par exemple, un moteur électrique à grand diamètre et faible longueur peut être inséré en lieu et place du volant d'inertie. Dans une configuration d'alternodémarrreur non intégré le moteur générateur électrique prend la place de l'alternateur conventionnel. Certains prototypes de ce type permettent de récupérer de l'énergie au freinage en ajoutant des supercondensateurs aux batteries de démarrage. Un autre avantage de cette configuration par rapport à l'architecture série est l'efficacité énergétique. Quand le moteur thermique fonctionne, une partie ou la totalité de son énergie est fournie aux roues à travers la transmission mécanique uniquement.

Inconvénients - Parmi les inconvénients de la configuration hybride parallèle est la conservation de la liaison mécanique du moteur thermique aux roues qui limite de ce fait les plages de fonctionnement optimaux et impose les transitoires du véhicule au moteur thermique. Cette liaison peut également être préjudiciable à l'agrément de conduite pendant les phases d'arrêt démarrage du moteur thermique et impose d'avoir une gestion spécifique de cette transition.

#### ***1.4.1.3 L'hybridation série/parallèle***

Dans cette configuration, la liaison entre les deux sources d'énergie combine les deux possibilités précédentes à savoir de type mécanique et électrique. L'agencement le plus simple rappelle la structure d'un hybride parallèle, combiné avec un alerno-démarrreur (Figure 1-24). Le véhicule hybride Tino de Nissan, commercialisé en 1998 et vendu à 100 exemplaires correspondait à cette configuration sauf qu'à la place de la boîte de vitesses, c'est une CVT qui a été utilisée pour la transmission mécanique (R. Trigui et al. 2003).

Une autre variante de l'architecture série/parallèle utilise deux embrayages (Figure 1-25) et permet ainsi quatre modes de fonctionnements:

- un mode hybride série quand l'embrayage 1 est ouvert et l'embrayage 2 est fermé ;
- un mode hybride parallèle
- un mode électrique utilisant la machine ME1 quand les deux embrayages sont ouverts ;
- un mode électrique utilisant les deux machines quand l'embrayage 1 est fermé et l'embrayage 2 est ouvert.

Un prototype de Dassul-Heuliez, la version hybride de la Cleanova, a été réalisé à la base de cette architecture mais n'a pas été commercialisé.

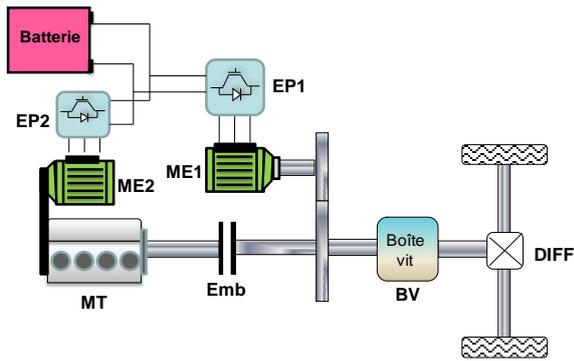


Figure 1-25 : Chaîne de traction hybride série parallèle à un embrayage

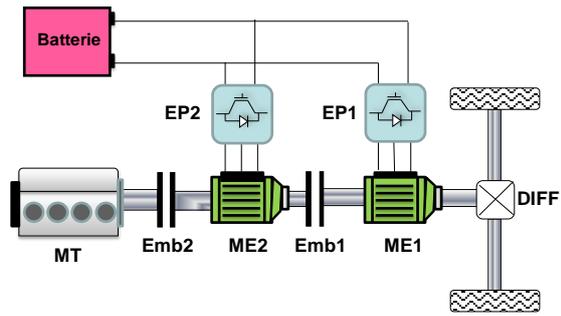


Figure 1-26 : Chaîne de traction hybride série parallèle à deux embrayages

Il est également possible de réaliser la combinaison série/parallèle en utilisant une transmission électrique continument variable (EVT). Ce type de transmission réalise une double fonction : d'une part le couplage des deux sources d'énergie, et d'autre part la variation de vitesse du moteur thermique à vitesse de roues donnée. Il est de ce fait inutile dans cette architecture d'utiliser une boîte de vitesse ou une CVT. La plus connue des architectures hybrides série/parallèle avec EVT est celle commercialisée par Toyota depuis 1997 (la Prius) et qui utilise un train épicycloïdal pour réaliser le couplage (Figure 1-26). Cette configuration peut être rencontrée également sous le nom de dérivation de puissance (« Power split » en Anglais).

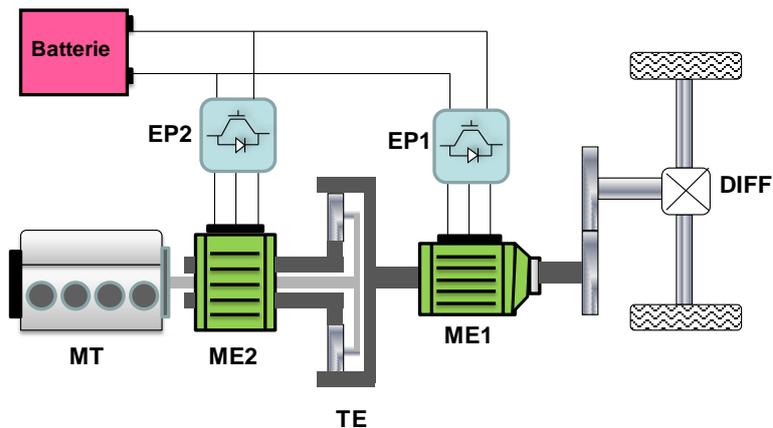


Figure 1-27 : Chaîne de traction hybride série parallèle avec train épicycloïdal

Une autre possibilité pour réaliser un hybride série/parallèle avec EVT est celle qui utilise deux moteurs électriques dont un est à double rotor (ME2 sur la Figure 1-27) (Hoeijmakers & Ferreira 2006a). Ce moteur permet de découpler la vitesse de rotation du moteur thermique de celle du moteur ME1 qui est lié aux roues via le différentiel.

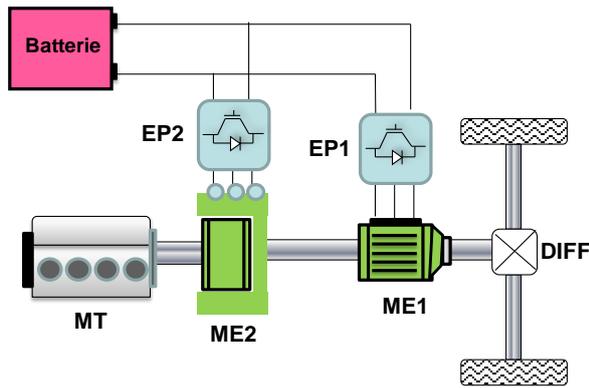


Figure 1-28 : Chaîne de traction hybride série parallèle avec moteur électrique à double rotor

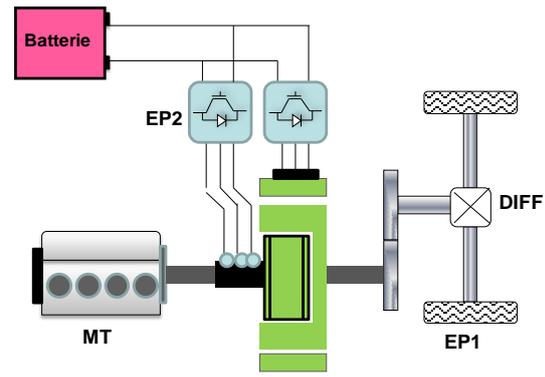


Figure 1-29 : Chaîne de traction hybride série parallèle avec moteurs électriques intégrés

Une version plus compacte de cette transmission utilise deux moteurs imbriqués avec un rotor interne, un rotor externe et un stator (Figure 1-28) (Yuan Cheng et al. 2009). Nous reviendrons plus en détail sur cette architecture dans le dernier chapitre.

Avantages - L'avantage de la configuration hybride série/parallèle est la possibilité d'avoir les deux types de liaisons et donc de fonctionner dans chacun des modes lorsque c'est avantageux. L'avantage des configurations avec EVT est de réaliser aussi la variation de vitesse pour faire fonctionner le moteur thermique sur les meilleurs points de rendement.

Inconvénients - Le principal inconvénient de l'hybride série parallèle est la nécessité d'avoir deux moteurs électriques avec leurs convertisseurs, augmentant ainsi son coût. Un autre inconvénient qui concerne les configurations avec EVT est le fait que la variation de vitesse impose un flux d'énergie, soit pour recharger la batterie, soit pour une recirculation vers le moteur de traction (ME1). Ce flux entraîne une efficacité énergétique limitée.

### 1.4.2 Classification selon les fonctions et le taux d'hybridation

Le taux d'hybridation représente l'importance relative de chacune des deux sources pour participer au système global. Cette importance peut être liée à la puissance, à l'énergie ou aux deux. Plusieurs définitions du taux d'hybridation se trouvent dans la littérature.

Certains auteurs (François Badin 1997) définissent ce taux comme le rapport entre la puissance maximale du moteur thermique et la puissance totale embarquée :

$$TH_1 = \frac{P_{mth\_max}}{P_{veh\_max}} \quad (1-1)$$

Ainsi,  $TH_1=0$  correspondrait à un véhicule électrique et  $TH_1=1$  à un véhicule thermique. Un véhicule faiblement hybridé avec cette définition est un véhicule à dominante électrique avec petit moteur thermique.

D'autres (Kermani 2009), considèrent le raisonnement inverse en partant plutôt d'un véhicule thermique conventionnel comme véhicule ayant un taux d'hybridation nul en posant :

$$TH_2 = \frac{P_{me\_max}}{P_{veh\_max}} \quad (1-2)$$

Cette puissance du moteur électrique est remplacée par certains auteurs (Julien Scordia 2004) par la puissance maximale de la batterie :

$$TH_3 = \frac{P_{bat\_max}}{P_{veh\_max}} \quad (1-3)$$

Cette dernière définition nous paraît la plus appropriée car elle se rapporte à la puissance de la source et non à celle du transformateur qui, dans certains cas comme nous le verrons par la suite, peut être amené à transformer de l'énergie provenant des deux sources. C'est cette définition du taux d'hybridation qu'on adoptera pour toute la suite.

A l'image du débat qui existe sur la notion d'hybridation, la liaison étroite entre le taux d'hybridation et les fonctions de l'hybridation possibles sont également à l'origine de certaines confusions dans la hiérarchisation de ces véhicules. Trois grandes classes sont généralement distinguées : le « micro », le « mild » et le « full » hybride. Nous nous attachons dans leur définition aux fonctionnalités possibles. Le taux d'hybridation sera perçu dans ce cas comme un domaine possible pour chaque classe, comme le montre la Figure 1-29.

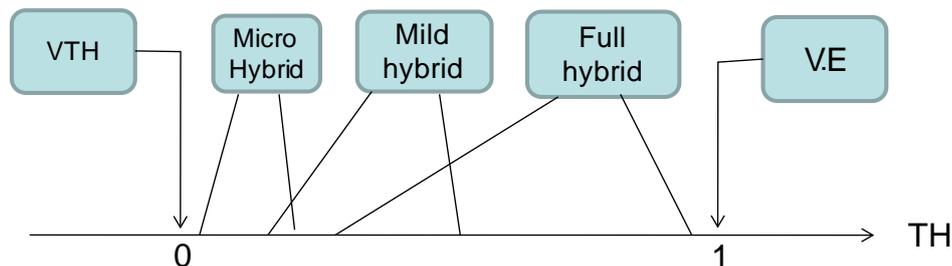


Figure 1-30 : Classification fonctionnelle et taux d'hybridation

- Le « micro-hybrid » : la seule fonction de l'hybridation possible pour cette classe est le Stop/start. Pour ce véhicule, la puissance de la batterie est sensiblement celle déjà installée sur le véhicule thermique (batterie de démarrage ou légèrement améliorée). Deux options existent pour ce type de véhicule : soit le démarreur est renforcé pour réaliser un nombre bien plus important de démarrages, soit l'alternateur et sa commande sont modifiés de façon à réaliser la fonction de démarrage (alternateur-démarrage). Le taux d'hybridation pour cette option est généralement inférieur à 0,1.

- Le « Mild-hybrid » : en plus de la fonction « Stop/start », la batterie de ce véhicule est dimensionnée de façon à récupérer une partie de l'énergie au freinage et à fournir une assistance partielle pour les grandes accélérations. Généralement, le taux d'hybridation dans ce cas ne dépasse pas 0,25.

- le « Full-hybrid » : c'est le véhicule hybride qui réunit toutes les fonctions possibles de l'hybridation. Le mode électrique peut présenter une puissance suffisante pour assurer les performances dynamique du véhicule, dans ce cas le taux d'hybridation est supérieur à 0,5.

Un mode électrique à puissance réduite peut être également possible. Dans ce cas le taux d'hybridation peut être nettement inférieur à 0,5.

Comme on peut le remarquer, toutes ces définitions sont basées sur la notion de fonctionnalités et de puissance et n'intègrent pas l'importance de l'énergie embarquée par la batterie. Selon l'importance de cette dernière, une part de l'énergie consommée peut être reportée vers le réseau électrique en introduisant la possibilité de recharge. Ainsi une autre classe de véhicules hybrides peut être distinguée :

- Le véhicule hybride rechargeable (VHR) : la fonctionnalité de recharge de la batterie par le réseau est en toute rigueur indépendante des fonctions actives et du taux d'hybridation. Néanmoins, en pratique, seule les hybrides de type « Full-hybrid » et « Mild-hybrid » sont concernés. En effet, cette fonctionnalité est généralement synonyme d'utilisation importante du mode électrique. La recharge sur le réseau de ce type de véhicule repose, à l'image du véhicule électrique, le problème de la disponibilité de l'énergie électrique produite. Une étude rapporte que pour le cas de la France, les projections indiquent que, selon certaines hypothèses, la production d'électricité pourrait couvrir 72% des VHRs (Turker et al. 2010).

### 1.4.3 Les différents niveaux de commandes

Le VHTE est un système complexe de par la multiplicité des sources d'énergie qui introduisent des fonctions nouvelles dans la gestion du véhicule. L'existence de plusieurs transformateurs d'énergie nécessite une commande spécifique pour chacun, l'objectif final du système impose quant à lui la synthèse d'une commande globale.

La Figure 1-30 représente un schéma général de la commande d'un véhicule hybride.

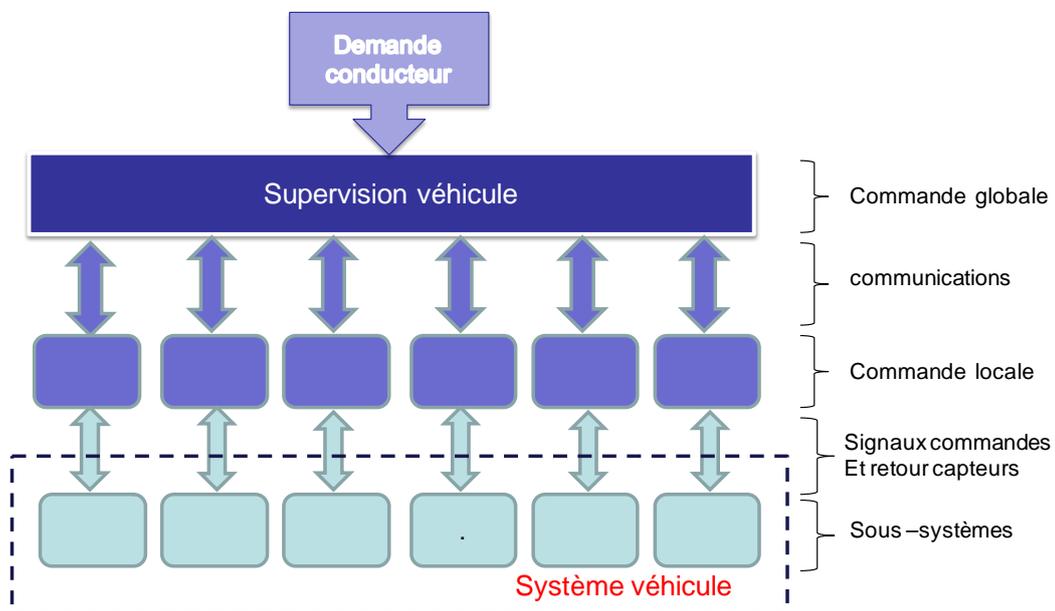


Figure 1-31 : Schéma général de la commande d'un véhicule hybride

Dans une première approche on peut distinguer deux niveaux de commande :

- une commande globale appelée aussi supervision ou gestion de l'énergie. Elle permet d'interpréter les ordres du conducteur et les relayer pour envoyer via un bus de

communication les références pour les différents composants du véhicule. Elle assure ainsi la répartition des flux de puissance entre les sous-systèmes.

- Une commande locale permettant de transformer la référence de la grandeur demandée au sous-système commandé en signaux utiles pour la commande rapprochée.

D'autres niveaux de commande, plus spécifiques comme la commande rapprochée des composants de puissance ou la commande des actionneurs de la transmission et des auxiliaires ne sont pas distingués ici et sont considérés comme associés soit au sous-système (sources/transformateur/charge) soit à sa commande.

#### **1.4.3.1 Demande du conducteur**

La demande du conducteur concerne deux aspects : la demande de traction ou de freinage et la demande d'actionner les auxiliaires de fonctionnement ou de confort. La demande de traction ou de freinage utilise généralement deux commandes matérialisées dans la pédale d'accélérateur et la pédale de frein. Les commandes des auxiliaires concernent la mise en marche des feux, de la climatisation, de l'auto radio etc. Dans les véhicules utilisant une boîte de vitesse manuelle, deux commandes pour le changement de rapport de vitesse sont nécessaires et consiste en la pédale de l'embrayage et le levier de changement de rapport. Dans le cas d'une boîte robotisée, une seule commande peut être accessible par le conducteur pour le changement de rapport de vitesse.

#### **1.4.3.2 La supervision globale**

La supervision globale de la commande doit répondre aux deux objectifs suivants :

- assurer la mission du véhicule en relayant les demandes du conducteur ;
- gérer les flux d'énergie entre les différents composants.

Cette commande globale fera l'objet de travaux exposés dans le chapitre 3.

#### **1.4.3.3 Les commandes locales**

Les commandes locales permettent de transformer la grandeur de référence demandée par la commande globale du système en commandes des différents actionneurs des sous-systèmes pour réaliser la grandeur désirée. Quant il existe des degrés de liberté dans la commande du sous-système, une stratégie locale peut être appliquée. Par le passé, nous nous sommes intéressés à ce niveau de commande pour le développement de commandes optimisées en énergie de machine asynchrone (Rochdi Trigui 1997) et synchrone à rotor bobiné (R. Trigui et al. 2001).

## **1.5 Approche systémique pour l'optimisation et l'aide au dimensionnement des véhicules hybrides**

### **1.5.1 Position du problème**

Comme il a été exposé plus haut, le véhicule hybride est un système complexe constitué de plusieurs sources et dont l'agencement de sa transmission peut faire appel à plusieurs sous-systèmes. La possibilité d'avoir des dimensionnements différents de la batterie par rapport au

moteur thermique couplée aux diverses topologies possibles rend le choix vaste et difficile pour un cahier des charges donné.

Mises à part quelques applications qui visent à augmenter les performances dynamiques des véhicules (vitesse et accélération), l'objectif de l'hybridation est principalement la réduction de la consommation énergétique et des émissions de polluants. C'est cet objectif qu'on considère ici dans tous nos travaux. Afin d'atteindre cet objectif, des optimisations sont nécessaires sur différents plans. Pour un usage donné du véhicule, les performances énergétiques et environnementales du véhicule hybride dépendent des trois aspects suivants :

- la topologie considérée (série, parallèle, mixte) ;
- le dimensionnement des composants (taux d'hybridation) ;
- la gestion de l'énergie (notamment au niveau de la commande globale).

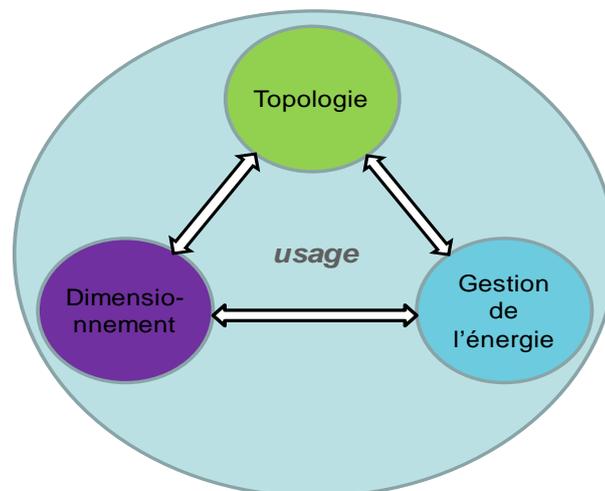


Figure 1-32 : Les trois dimensions couplées de l'hybridation

Ces trois aspects sont fortement couplés (Figure 1-31). En effet la loi de gestion de l'énergie qui va répartir les consignes instantanées entre les sources doit prendre en compte la capacité (donc la taille) des différents composants. Inversement, l'utilisation fréquente ou en profondeur de certains composants suite à une stratégie de gestion donnée impose un dimensionnement en conséquence de ces composants. Tout ceci étant valable pour une topologie donnée.

Pour appréhender ces différentes dimensions et leur couplage, une approche systémique s'appuyant sur la modélisation a été mise en place avec les membres de l'équipe Véhicules électriques et hybrides du LTE. Cette approche a débouché sur des outils de simulations qui feront l'objet d'une présentation au deuxième chapitre. Ces outils ont ensuite été utilisés pour servir les objectifs d'optimisation de la gestion de l'énergie et d'aide au dimensionnement optimal des véhicules hybrides. Depuis 2006, plusieurs collaborations dans le cadre du réseau MEGEVH<sup>10</sup> ont permis également d'approfondir certaines recherches dans ces domaines.

<sup>10</sup> Le réseau MEGEVH est un groupement collaboratif créé en 2006 suite à l'initiative RT3 du ministère de la recherche, sous la responsabilité du L2EP de l'université de Lille. Le LTE participe depuis cette création à l'animation de ce réseau, constitué de laboratoires publics et d'industriels du domaine. Plusieurs collaborations scientifiques concernant la modélisation et la gestion de l'énergie des véhicules hybrides ont été menées dans le cadre de ce réseau. Pour plus de détail, voir annexe 1.

### **1.5.2 Approche systémique pour la simulation des véhicules hybrides**

Afin de pouvoir répondre au problème de diversité des solutions hybrides, une approche systémique basée sur la modélisation a été choisie. Le système véhicule peut être considéré comme le couplage de différents sous-systèmes en interaction entre eux et avec l'environnement du véhicule. L'association des sous-systèmes de différentes tailles selon un agencement hybride donné et répondant au cahier des charges, leurs commandes locales puis la synthèse de la commande globale pourraient être intégrés dans une démarche globale. La modélisation peut jouer dans cette démarche un rôle prépondérant pour les raisons suivantes :

- diminution importante des coûts des recherches par la réduction de nombre d'expérimentations et de prototypes ;
- structuration plus rationnelle des études ;
- modularité vis-à-vis de l'évolution des technologies et des critères.

Dans ce cadre, le travail de recherche en équipe au LTE a abouti à la création d'une bibliothèque de modèle sous Matlab-simulink appelée VEHLIB (Rochdi Trigui et al. 2004), (B. Jeanneret et al. 1999), (Emmanuel Vinot et al. 2008). Initiée avec les membres de l'équipe en 1998, elle a été ensuite enrichie avec les apports des chercheurs, des thésards, des stagiaires et des personnels temporaires de l'équipe. Cette bibliothèque a également profité des différentes collaborations que ce soit en interne à l'institut (Laboratoire des Technologies Nouvelles) dans le cadre du projet fédérateur HYBRID de l'IFSTTAR, ou plus récemment, les travaux dans le cadre du réseau MEGEVH avec une ouverture de VEHLIB sur la Représentation Energétique Macroscopique (REM).

S'appuyant sur une approche systémique, cette bibliothèque de modèle utilise une représentation en schéma bloc dont les entrées-sortie obéissent à une analogie avec les graphs de liens (« Bond Graphs ») (Dauphin-Tanguy 1999). L'utilisation de l'environnement Matlab/Simulink a guidé ce choix de par l'existence de l'approche systémique par schéma bloc à entrées/sorties multiples dans cet environnement. La performance des solveurs, associée à une possibilité immédiate de passage en temps réel pour la commande des systèmes, a conforté le choix de ces outils pour la mise en œuvre des modèles des sous-systèmes du véhicule et leur utilisation dans une démarche « HIL » (« Hardware In the Loop »).

Aujourd'hui, on peut recenser un nombre considérable d'outil systémique spécialisé dans la modélisation énergétique et dynamique des véhicules hybrides, plusieurs références seront citées dans le chapitre 2. Pour VEHLIB, en plus des avantages de la maîtrise en interne de tous les modèles et les utilitaires associés, la plus value de cette bibliothèque est incontestablement le travail d'équipe pour une capitalisation ainsi que les moyens de validation associés dont dispose le LTE. S'appuyant ainsi sur des modèles approuvés expérimentalement, nous avons contribué aux travaux de recherches sur les différents agencements hybrides, sur les lois de gestion de l'énergie les plus performantes ainsi que sur l'aide au dimensionnement des composants.

### **1.5.3 Gestion de l'énergie**

La gestion de l'énergie est la partie de la commande qui assure la répartition de la demande entre les sources d'énergie et le contrôle de l'état de charge de la batterie tout en garantissant le relai de la demande du conducteur pour le mouvement du véhicule et l'actionnement des accessoires (figure 41). Des travaux abondants ont été consacrés à cette thématique cette dernière décennie dont les contributions les plus remarquables sont (Buntin & Howze 1995), (Paganelli et al. 2000), (S. Delprat et al. 2004), (Reza Langari & J.-S. Won 2005), (Kessel 2006). Différentes méthodes ont été utilisées pour la gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides, une classification de ces méthodes peut être trouvée dans (Salmasi 2007) et (Crolla et al. 2008). Nous reviendrons sur le détail de ces différentes méthodes dans le chapitre 3.

Ma contribution dans ce domaine a consisté en l'amélioration des méthodes à base de règles expertes notamment lors d'un programme Industriel MILDHYBRID que j'ai dirigé en collaboration avec Valeo. Ensuite le co-encadrement de deux thèses sur l'optimisation de la gestion de l'énergie de point de vue de la consommation de carburant a permis de développer de nouvelles méthodes (Julien Scordia 2004), (Kermani 2009). Tous ces travaux se sont appuyés sur une démarche utilisant la modélisation ainsi que l'expérimentation sur banc d'essai dans une configuration de véhicule émulé (Hardware In the Loop) (Rochdi Trigui et al. 2009).

Ces travaux ont été ensuite étendus à la gestion des véhicules à sources de stockage mixte (batterie/supercondensateurs) notamment lors d'une thèse co-encadrée au sein du réseau MEGECH (Anne Laure Allègre 2010). Nous reviendrons plus en détail sur ces travaux lors des perspectives exposées dans le chapitre 5.

### **1.5.4 Aide au dimensionnement**

Dans un véhicule hybride, le dimensionnement des composants représente une tâche difficile de par la complexité des topologies et en même temps importante étant donné les enjeux économiques et environnementaux qui en découlent. Dimensionner au plus juste ces composants pour satisfaire un cahier des charges demande des indications liées au rôle et à la sollicitation prévue de chaque sous-système. Ces indications peuvent être données par une approche appropriée d'aide au dimensionnement visant le taux d'hybridation optimal. Peu de travaux ont été réalisés dans ce sens, nous pouvons en citer quelques uns (Geller et al. 2010), (Dominik Buecherl et al. 2009), (Knoke & Böcker 2007). La plupart des travaux concernant le dimensionnement (le terme Anglais « design » est plus approprié ici) traite plutôt de composants comme les moteurs électriques (Wu et al. 2009), (Faiz & Moayed-Zadeh 2005), ou les transmissions mécaniques (Kim et al. 2006) souvent sortis du contexte global en leur appliquant un cahier des charges spécifique. Ce genre de recherches est nécessaire dans chaque domaine, mais doit être précédé d'un pré-dimensionnement ou d'une aide au dimensionnement déduite d'une approche globale incluant la mission et l'architecture du véhicule.

La démarche globale d'aide au dimensionnement que nous avons proposée dans (Rochdi Trigui et al. 2004), (Julien Scordia et al. 2004) repose en grande partie sur la modélisation évoquée ci dessus. Cette démarche est décrite plus en détail au chapitre 4.

## **1.6 Conclusion**

La complexité et la diversité des agencements et des tailles des composants des véhicules hybrides nécessitent une démarche structurée pour appréhender le problème d'optimisation de ces véhicules. Cette optimisation concerne aussi bien la topologie, la gestion de l'énergie et le dimensionnement des composants. Une approche par modélisation s'appuyant sur une démarche systémique est déclinée tout au long de ce travail pour aborder les différents aspects précités. Le chapitre 2 sera consacré à la présentation des outils de simulation développés dans le laboratoire. La gestion de l'énergie a fait l'objet de travaux spécifiques exposés dans le chapitre 3. L'étude du problème de dimensionnement et son orientation vers une démarche d'aide à l'eco-conception sera présenté dans le chapitre 4. Enfin, une tentative de généralisation des travaux à des systèmes multi-sources ainsi que des perspectives concernant les différents sujets traités feront l'objet du dernier chapitre.

## **2 Chapitre 2 : Outils et méthodes pour la simulation des véhicules hybrides**

### **2.1 Introduction**

Pour le véhicule hybride, la diversité des configurations possibles et la multiplicité de dimensionnements répondant à un cahier des charges donné rendent le développement d'outils d'aide à l'optimisation indispensable. L'optimisation considérée dans les travaux présentés ici concerne principalement deux aspects :

- la commande globale du véhicule permettant la gestion de l'énergie entre ses sources,
- le dimensionnement des composants du véhicule.

Les outils de simulation développés à cet effet au sein de l'équipe VEH du LTE et décrits dans ce chapitre utilisent une vision systémique du véhicule et de sa chaîne de traction. Dans leur construction ces outils s'appuient sur des principes utilisés dans certaines représentations physiques et dynamiques. Après un rappel succinct de la systémique et de ses principes, différents types de modèles sont évoqués. Un état de l'art sur les représentations énergétiques et dynamiques appliquées aux véhicules hybrides est réalisé. Après un rappel des objectifs des travaux, les outils de simulations utilisant une démarche systémique développés au LTE sont exposés. Des cas d'application du logiciel développé sont ensuite étudiés pour illustrer différentes possibilités. L'ouverture de ces outils a été également démontrée par des collaborations dans le cadre du réseau MEGEVH et dans les quelles la Représentation Énergétique Macroscopique a été utilisée pour la structuration de modèle et la synthèse systématique de structures de commande.

### **2.2 Généralités et état de l'art**

#### **2.2.1 La systémique**

##### **2.2.1.1 Principe**

La systémique est une approche développée depuis les années 40 pour appréhender les phénomènes complexes transdisciplinaires. Elle s'efforce de concevoir un cadre et une méthodologie pour l'analyse et la prédiction de comportement de systèmes complexes. Le système, objet central de l'approche, est défini comme un ensemble de sous-systèmes, ou composants, en interactions entre eux et avec leur environnement.

D'abord développée dans le domaine des sciences de l'ingénierie et des sciences de la vie, la systémique a été ensuite appliquée à différents domaines comme l'écologie (de Rosnay 1975), le management et la qualité (Association Rebis 2011), les sciences animales (D. Sauvat 2003), les sciences de l'éducation (Association Rebis 2011).

Dans le cadre des recherches sur les véhicules électriques et hybrides, la démarche systémique a connu ces dernières décennies un intérêt croissant (Astier 2003), (Alain Bouscayrol 2003), (Walter Lhomme 2007). La complexité et la pluridisciplinarité nécessaire à

l'étude du véhicule hybride ont fait de la systémique un moyen incontournable pour l'aide à sa conception et son optimisation.

Les principes de bases de la systémique peuvent se résumer selon les définitions suivantes.

- Le principe d'organisation : un système correspond à une organisation spatiale et temporelle qui dépend de sa finalité (D. Sauvat 2003).

- Le principe de subjectivité ou influence de l'environnement et de l'observateur : la systémique s'appuie sur des modèles et des représentations pour lesquels l'observateur joue un rôle primordial. En effet c'est lui qui organise la représentation du système selon les finalités qu'il s'est fixées.

- Le principe de totalité (ou d'émergence) : il repose sur le fait qu'un système ne peut pas être réduit à ses composants mais représente un tout indissociable de par les interactions qui existent entre les sous-systèmes. Ces interactions peuvent générer des propriétés du système qui n'existent dans aucun de ses composants.

- Le principe d'évolution : la poursuite des objectifs pour lesquels le système existe ou a été créé peut amener ce système à subir des modifications au cours du temps. Ceci concerne surtout les systèmes biologiques ou sociaux, mais peut également concerner les systèmes physiques qui subissent des variations de paramètres au cours du temps.

- Le principe de finalité : il existe a priori plusieurs manières pour réaliser un même objectif avec un même système.

Généralement la systémique s'appuie sur des outils de représentation et de modélisation pour faciliter la compréhension et avoir une vision générale des sous-systèmes et de leurs interactions.

### ***2.2.1.2 Modèle, représentation et simulation***

Pour un système donné, l'établissement d'un modèle permet de prédire certaines de ses propriétés dans un domaine de validité donné. L'orientation de l'objectif du modèle conduit à négliger certains phénomènes présents dans le système ou ne couvrir qu'une partie de l'espace total du système. La représentation du système est une étape qui permet d'organiser les éléments du modèle pour mettre en évidence certaines propriétés. Ainsi, une fois le modèle mathématique du système établi, plusieurs représentations sont possibles (Chan et al. 2010) (Figure 2-1). La dernière étape qui conduit à la simulation du système est une exploitation du modèle selon la représentation choisie en utilisant les outils numériques appropriés.

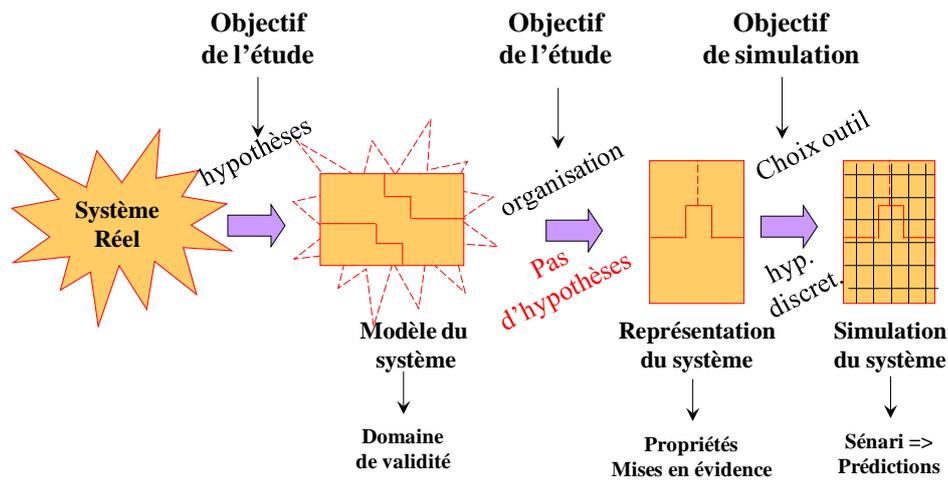


Figure 2-1 : Du système réel à sa simulation, les différentes étapes

Ainsi, pour tout ce qui suit, nous distinguerons les représentations, spécialement de type graphiques pour celles qui nous intéressent, du modèle proprement dit du système qui repose sur une formulation mathématique, empirique ou découlant d'une théorie, permettant de décrire sa structure ou son fonctionnement. Nous verrons par la suite que selon le cas, une représentation peut contenir implicitement des détails du modèle comme elle peut rester purement schématique.

## 2.2.2 Les différents types de modèles

### 2.2.2.1 Modèle de connaissance et modèle de comportement

La modélisation d'un système peut faire appel à deux grandes familles de modèles.

- **Modèle de connaissance** : il met en évidence les caractéristiques du système en décrivant par des équations mathématiques les phénomènes physiques qui régissent son fonctionnement.

- **Modèle de comportement** : le modèle du système ne nécessite pas de connaissance sur sa structure ou son fonctionnement mais uniquement sur son comportement vis-à-vis de sollicitations externes.

### Description structurelle et fonctionnelle

Pour réaliser un modèle de connaissance d'un système physique deux approches sont possibles.

- **L'approche structurelle** : elle met en avant la structure du système. La représentation du modèle s'approche de ce fait de la géométrie ou de l'organisation spatiale du système.

- **L'approche fonctionnelle** : le modèle décrit les fonctionnalités du système sans lien nécessaire avec sa structure. Elle correspond à une organisation temporelle.

Certains outils de modélisation utilisent les deux approches en même temps en donnant cependant une priorité structurelle ou fonctionnelle.

### **2.2.2.2 Les modèles causaux et acausaux**

La causalité est un des éléments de base pour comprendre les systèmes dynamique, leur évolution et les lois régissant les interactions entre les différents sous-systèmes. Chaque phénomène existant dans le système ou dans les échanges avec son environnement obéit à la notion de cause et d'effet (dans les sciences humaines on parle de dose/réponse). Les modèles causaux sont organisés de façon à ce que les éléments soient orientés dans un sens ascendant ou descendant (toujours de la cause vers l'effet ou inversement). Quand aucun sens d'orientation n'est choisi à priori pour l'organisation des sous systèmes, on parle de modèles acausaux.

Il est à noter que causalité physique est la causalité intégrale : la sortie ne peut être qu'en retard par rapport l'entrée (Iwasaki & Simon 1994), (Hautier & Faucher 1996).

### **2.2.2.3 Les modèles directs et inverses**

Les modèles directs sont orientés de façon telle qu'à partir de la cause on aboutit à l'effet. C'est la formulation la plus intuitive et la plus « naturelle » pour organiser un système et l'analyser. En revanche, pour des objectifs différents, en particulier la conception, il est tout à fait possible d'organiser le système en partant des effets observés pour remonter aux causes qui en sont responsables. On parle alors de modèle inverse. Dans la littérature Anglophone on parle de modèle « forward » et de modèle « backward » (Markel et al. 2002).

### **2.2.2.4 Les modèles dynamiques, statiques et quasi-statiques**

Un système dynamique est un système dont la sortie est en retard par rapport à l'entrée. Pour un système dynamique, on peut concevoir un modèle dynamique qui tente de prendre en compte les différents phénomènes transitoires qui régissent son fonctionnement et son évolution. Si ces phénomènes transitoires n'apportent pas de connaissances supplémentaires par rapport à la finalité visée par le modèle, ils peuvent être négligés. On utilise ainsi un modèle statique pour ce système dynamique. Si certains phénomènes seulement, comme des transitoires rapides, sont négligés, on parle dans ce cas de modèle quasi-statique.

## **2.2.3 Les représentations énergétiques et dynamiques des systèmes appliquées aux véhicules hybrides**

La transdisciplinarité des systèmes complexes a conduit au développement de méthodologies pour appréhender leurs modélisations, leurs conceptions et/ou leurs commandes. S'appuyant sur les analogies qui existent entre les différents domaines de la physique, ces méthodologies se réfèrent le plus souvent à l'élément commun qui est l'énergie. On trouve dans la littérature plusieurs méthodes de représentation et modélisation des systèmes multi-physiques. Une revue assez détaillée de ces méthodes a été réalisée dans (Alain Bouscayrol 2003), (Walter Lhomme 2007). Une partie d'entre elles a été appliquée à la modélisation des véhicules hybrides. Dans ce qui suit nous présentons quelques unes d'entre elles. Un focus spécial sera fait dans le paragraphe suivant sur la méthode de la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) de par son utilisation dans les travaux exposés plus loin.

### **2.2.3.1 Les représentations par schéma bloc et fonction de transfert**

La représentation des sous-systèmes d'un système physique par des schémas bloc est une pratique très courante dans les différents domaines de la physique prenant ses sources dans l'approche cybernétique. Représentés par un rectangle et un ensemble de port d'entrées et sorties, les sous systèmes sont ensuite interconnectés entre eux et avec leur environnement.

Dans les systèmes dynamiques, cette approche est très utilisée dans le domaine de l'automatique pour la conception des régulations. Les systèmes dans ce cas peuvent n'être identifiés que par leurs réponses à des sollicitations données, sans aucune indication sur leurs paramètres constitutionnels et fonctionnels. On parle ici de Boîte noire (ou approche cybernétique).

Un modèle mathématique peut être associé à cette représentation sous forme de fonction de transfert. Cette fonction représente l'évolution des sorties (souvent associés à des variables décrivant l'état du sous-système) quand les entrées présentent des évolutions temporelles données.

Ces représentations par schéma bloc sont très utilisées dans le domaine de la modélisation des véhicules hybrides même si la modélisation par fonction de transfert n'est pas toujours rigoureusement appliquée (Karen L. Butler et al. 1999), (Lino Guzzella & Mois Amstutz 1999), (Marco Amrhein & Philip T. Krein 2005), (Van Mierlo & G. Maggetto 1999). Des modèles mathématiques plus complexes introduisant les non-linéarités sont de plus en plus utilisés.

### **2.2.3.2 Les graphes de lien**

Une théorie de connexion entre systèmes, appelée graphe de lien (« Bond-Graph »), a été déjà appliquée au domaine de la dynamique des systèmes par Karnopp et Rosenberg en 1990 (Karnopp et al. 1990). Le concept des graphes de lien lui même est plus ancien puisque énoncé en 1961 par Paynter (H. M. Paynter 1960). Cette théorie, basée sur le principe de la conservation de l'énergie, propose que le flux d'énergie entre deux sous systèmes d'un système physique s'exprime comme le produit de deux variables qui constituent les ports du système. L'une matérialise un flux de particules, réelles ou fictives, appelée flux  $f$ , et l'autre, plutôt de nature intensive, appelée effort  $e$ . La représentation graphique du lien entre les sous-systèmes est la suivante.

Soient deux composants A et B d'un système physique. Une énergie qui transite de A vers B est représentée par un lien avec une demi-flèche qui indique le sens du flux d'énergie.

Les règles de connexions relatives à la théorie des graphes de lien imposent alors que deux éléments ou sous-systèmes reliés entre eux ne peuvent pas imposer tous les deux l'effort ou le flux. On parle alors de règle de causalité. Dans la représentation graphique, l'élément qui impose le flux aura une barre à ses ports (Figure 2-2).

Il est à noter que le Bond-Graph est une représentation à priorité structurelle, et que la causalité n'est défini qu'a posteriori (Gawthrop & Bevan 2007). Si la causalité physique (intégrale) est préférentielle, elle n'est pas obligatoire, et ce, pour respecter la structure du système.

A  B	A  B	A  B
a) connexion acausale	b) A impose le flux	c) B impose le flux

Figure 2-2 : représentation graphique d'un graphe de lien entre deux sous systèmes

Les variables d'effort et de flux sont dépendantes du domaine physique, ou en d'autre terme de la nature de l'énergie qui transite par le sous système (Dauphin-Tanguy 2000). Sur le Tableau 2-1 sont données les correspondances les plus usuelles entre le type d'énergie et les variables d'effort et de flux.

Tableau 2-1 : Variable d'effort et de flux correspondant à différents types d'énergie

Type d'énergie	Variable de flux	Variable d'effort
Mécanique de translation	La vitesse linéaire	La force
Mécanique de rotation	La vitesse angulaire	Le couple
Thermique	Le flux d'entropie	La température
Electrique	Le courant	La tension
Hydraulique	Le débit volumique	La pression
Magnétique	La dérivée du flux	La force magnétomotrice

Les graphes de lien ont été appliqués au domaine du transport aérien (Langlois et al. 2005), ferroviaire (Gandanegara et al. 2005), à la modélisation des véhicules électriques et hybrides (Marquis-Favre, Bideaux, Mechin, et al. 2006), (Filippa et al. 2005) et sont toujours utilisés aujourd'hui dans des publications récentes (Geitner 2010).

### 2.2.3.3 Le graph informationnel causal

Le Graph Informationnel Causal (GIC) a été mis au point suite à une collaboration entre deux laboratoires Français, le LEEI de Toulouse et le L2EP de Lille (Hautier & Faucher 1996). Le formalisme de représentation proposé par le GIC repose sur une causalité intégrale exclusive avec une distinction entre deux types d'éléments principaux : ceux à relation causale (de fait intégrale) et ceux à relation rigide (relation algébrique sans dépendance du temps) (Figure 2-3).

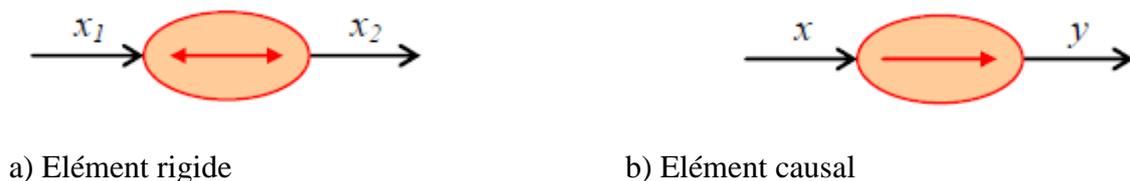


Figure 2-3 : les deux éléments principaux du GIC

Tous les éléments électromécaniques sont représentés par une composition de ces deux types élémentaires. Les variables relatives à la transmission de puissance entre deux éléments sont de type potentielle (à l'image de l'effort dans le Bond-Graph) ou cinétique (flux). Le graphe global donne des informations sur l'organisation des éléments et le respect de la causalité sans mettre en évidence les relations liant les différentes variables. Contrairement au

Bond-Graph, le GIC est une représentation à priorité fonctionnelle, de par sa causalité intégrale (physique) exclusive. Etant donné la similitude de tous les éléments du graphe, son application à des systèmes complexes rend sa lecture difficile. Un des intérêts du GIC est la déduction systématique de la structure de commande du système en utilisant le principe d'inversion (Hautier & Faucher 1996), (Barre et al. 2006). L'inversion d'un élément avec une relation rigide se fait directement en inversant les relations analytiques. L'inversion d'un élément à relation causale est réalisée par l'introduction d'un correcteur afin d'asservir la variable de sortie.

Le GIC a été appliqué surtout dans le domaine de la modélisation des convertisseurs statique (Hautier & Caron 1999) des machines électriques (Caron & Hautier 1995), des actionneurs piézoélectriques (Giraud et al. 2004) et bien d'autres systèmes électriques et électroniques.

### 2.2.3.4 La représentation POG

La représentation graphique POG « Power Oriented Graph » a été mise au point à l'Université de Modène et de Reggio Émilie en Italie (Zanasi 1996). Elle permet de représenter un système physique en connectant les éléments élémentaires qui sont principalement de deux types : bloc d'élaboration et bloc de connexion (Figure 2-4).

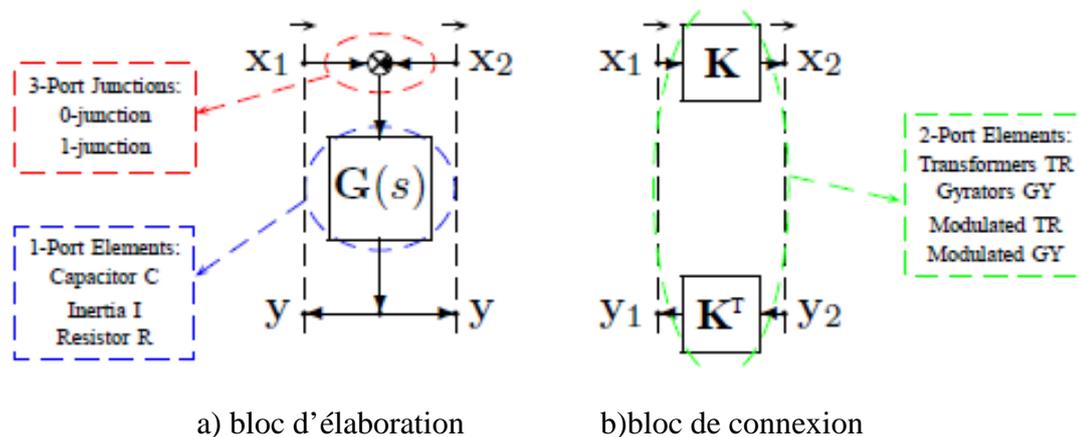


Figure 2-4 : les deux éléments principaux de la POG

Le bloc d'élaboration est utilisé pour représenter tous les éléments d'accumulation et rappelle les éléments causaux du GIC. Le bloc de connexion réalise des opérations algébriques et permet de représenter les transformateurs.

Cette représentation est analogue à la théorie des graphes de lien par deux aspects.

- La représentation utilise des variables élémentaires pour la répartition de la puissance à l'image du flux et l'effort dans le Bond Graph. En revanche, ces variables n'ont pas la même classification puisqu'elles représentent d'une part les variables intensives (Tension, vitesse, Pression ...) et les variables extensives (courant, forces, couples, débit ...).

- Une déduction systématique des fonctions de transfert qui relient les différents sous systèmes est possible.

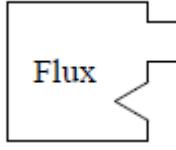
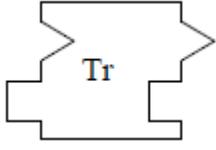
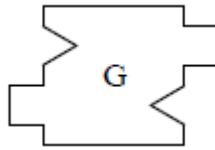
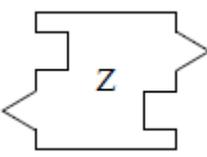
- Les nœuds énergétiques ne sont pas explicites. La représentation du système global est difficile à lire pour un non spécialiste.

Cette représentation a été appliquée à la modélisation de véhicules hybrides comme rapporté dans (Zanasi & Grossi 2010). Dérivée du Bond-Graph, c'est une représentation avant tout à priorité structurelle.

### 2.2.3.5 Le puzzle énergétique

La représentation des puzzles énergétiques est basée sur une approche graphique inspirée de la constitution des Puzzles. Chaque sous système est représenté par une pièce de puzzle dont les excroissances et les creux correspondent aux variables d'effort et de flux dérivées du Bond Graph. Les principales pièces du puzzle sont données sur le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Les principales pièces du puzzle de l'approche des puzzles énergétiques

			
Elément imposant son effort	Elément imposant son flux	Transformateur	Gyrateur effort-flux
			
Gyrateur flux-effort	connexion équi-effort	connexion équi-flux	

Cette représentation a été développée au Laboratoire Laplace (anciennement le LEEI) de Toulouse (France) et a été appliquée à la conception des systèmes d'électronique de puissance (Piquet et al. 2000).

### 2.2.4 La REM

La Représentation Energétique Macroscopique (REM) est une méthode graphique pour la représentation des systèmes complexes. Conçues au L2EP de Lille dans les années 2000, suite aux travaux du GDR SDSE<sup>11</sup>, avec le LEEI de Toulouse, le GREEN de Nancy, le GE44 de Nantes et le SATIE de Cachan (A. Bouscayrol et al. 2000), elle a été appliquée au départ à la structuration et la synthèse de commandes de systèmes électromécaniques utilisant plusieurs machines et plusieurs convertisseurs (Alain Bouscayrol 2003), (A. Bouscayrol et al. 2005). A partir des années 2000 elle a été utilisée pour la représentation et la commande de véhicule électrique et hybrides (K. Chen et al. 2008), (W. Lhomme et al. 2004).

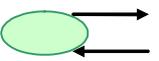
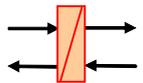
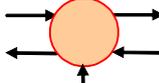
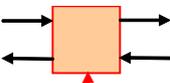
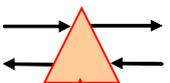
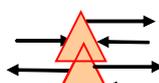
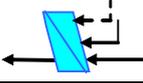
La REM repose sur plusieurs principes.

- Chaque élément est représenté par un pictogramme qui peut être différent selon la fonction ou le domaine de l'énergie concerné (Tableau 2-3).

<sup>11</sup> Groupe de Recherche (GdR) du CNRS « Sécurité et Disponibilité des Systèmes Electrique » (1998-2001)

- Les éléments d'accumulation ont une représentation commune quel que soit le domaine.
- Chaque élément communique avec l'élément adjacent à travers deux variables appelées action et réaction et dont le produit représente la puissance qui transite entre les deux éléments.
- Comme toute méthode utilisant les échanges énergétique, la REM respecte le principe de la conservation de l'énergie.
- Seule la causalité intégrale est autorisée.

**Tableau 2-3 : les éléments fondamentaux de la REM**

	Source d'énergie		Élément avec accumulation d'énergie		Convertisseur électromécanique (sans accumulation d'énergie)
	Convertisseur électrique (sans accumulation d'énergie)		Convertisseur mécanique (sans accumulation d'énergie)		Couplage mécanique (distribution d'énergie)
	Bloc de commande sans correcteur		Bloc de commande avec correcteur		Variables d'action et de réaction

Les travaux de la REM appliqués aux véhicules hybrides se sont ensuite étendus avec les travaux de Lhomme (Walter Lhomme 2007) et de Chen (Keyu Chen 2010).

Cette méthode connaît aujourd'hui un grand essor dans le domaine de la modélisation et la gestion de l'énergie des véhicules en France et dans le monde. A l'échelle nationale, cette méthode est largement utilisée dans le cadre du Réseau MEGEVH. Des applications très complexes à l'image des travaux sur un véhicule à 6 roues motrices rapportés dans (Boulon et al. 2010), ou appliqué à la Pile à Combustible (Chrenko et al. 2010) se sont appuyées sur cette représentation pour la modélisation et la synthèse de la commande. Au niveau international cette méthode est utilisée dans plusieurs pays tels que la Chine (Y. Cheng et al. 2009) le Canada (Djani et al. 2006) et la Suisse (Bossmann et al. 2007).

Un des intérêts majeurs de la REM est la synthèse systématique de la structure de commande nécessaire pour piloter le système. Deux étapes sont alors souvent nécessaires. Dans un premier temps une structure maximale de commande (SMC) est déduite par une logique d'inversion propre à la REM. Seulement, cette structure ne tient pas compte d'une limitation éventuelle de nombre de capteurs nécessaires pour des raisons physiques et économiques. La deuxième étape consiste alors à tenir compte de certaines contraintes de disponibilités des mesures en éliminant certains correcteurs ou en introduisant des estimateurs pour remplacer les capteurs.

### ***2.2.5 Les logiciels de simulation des véhicules hybrides***

Les premiers logiciels de simulation de véhicules hybrides développés dans les années 90 utilisaient principalement des langages de programmation séquentielle. Le logiciel VERT développé au LTE en 1995 (François Badin 1997) a été programmé en langage Fortran par exemple. Même si la systémique commençait à s'imposer au domaine en suggérant une

organisation par sous-programme correspondant chacun à un sous-système, la lisibilité au niveau global de ces programmes restait très compromise. De plus, la modification ou l'ajout de topologies représentait un nouvel effort conséquent de programmation. Assez tôt, les recherches se sont orientées vers des outils systémiques avec des interfaces graphiques permettant de relier les modèles à la structure physique du véhicule. Certains logiciels ont profité de la généralisation d'outils de calcul scientifique orientés objet. Nous pouvons citer la plateforme Matlab/Simlink qui a connu un grand essor dans ce domaine. Le Logiciel Advisor (Markel et al. 2002), un des premiers à utiliser cette plateforme, a été réalisé par le NREL et distribué gratuitement. Il fait aujourd'hui encore référence dans des publications récentes surtout pour sa base de données fournie. D'autres logiciels, commercialisés comme Psat développé par l'ANL (Rousseau & Pasquier 2001) ou restant en utilisation interne comme c'est le cas chez plusieurs constructeurs automobiles (Emmanuel Combes et al. 1998) ou laboratoires publics (Karen L. Butler et al. 1999) utilisent également cette plateforme. Une autre plateforme, Labview, ayant les mêmes avantages que Simulink, a été également utilisée par d'autres auteurs (Van Mierlo, Van den Bossche, et al. 2004). D'autres concepteurs ont préféré réaliser leurs propres interfaces de représentation avec une icône associée à chaque sous-système. Une programmation en C permet ensuite pendant la phase de compilation de relier les modèles aux icônes des sous-systèmes. Nous pouvons citer le cas des logiciels commerciaux comme AMEsim (Marquis-Favre, Bideaux & Scavarda 2006) et Dymola (Otter et al. 1996). La plupart de ces logiciels utilisent la notion de librairie (ou bibliothèque de modèle) pour proposer des modèles de sous-systèmes utilisables d'une manière simple et modulaire par des concepteurs de véhicules hybrides.

Au LTE, et après le logiciel VERT qui avait montré ses limites « systémiques », notre choix s'est porté sur l'option Matlab-Simulink pour la conception d'un nouvel outil. Dans ce qui suit nous allons décrire la démarche suivie pour le développement du nouveau logiciel de simulation des véhicules hybride du LTE, VEHLIB.

## ***2.3 Outils de simulation de véhicules hybrides : présentation du logiciel VEHLIB.***

### ***2.3.1 Rappel des objectifs***

Comme nous l'avons exposé au chapitre 1, l'étude des véhicules hybrides comporte plusieurs aspects et doit s'appuyer sur une approche systémique utilisant la modélisation. Les deux objectifs que nous avons visés dans le développement d'un outil de simulation de véhicules hybrides sont les suivants (Figure 2-5) :

- la conception de la commande du véhicule, et plus spécialement le niveau global qui permet l'optimisation de la gestion de l'énergie ;
- l'aide au dimensionnement des composants pour un cahier des charges donné.

Le premier objectif a nécessité le développement d'un outil de simulation dynamique et directe pour une gestion de l'énergie en ligne pouvant être implémentée en temps réel. Les modèles associés et les hypothèses de calculs permettent une évaluation énergétique assez fine du véhicule hybride et de la loi de gestion associée. Une partie du premier objectif utilise également un modèle inverse quasi-statique avec des hypothèses simplifiées pour la synthèse de la commande globale. Plus de détail sera donné dans le chapitre 3 sur ce processus.

Le deuxième objectif utilise le modèle inverse dans la procédure de l'aide au dimensionnement optimal et le modèle direct pour la vérification des performances dynamiques liées au cahier des charges. Ces aspects seront exposés dans le chapitre 4.

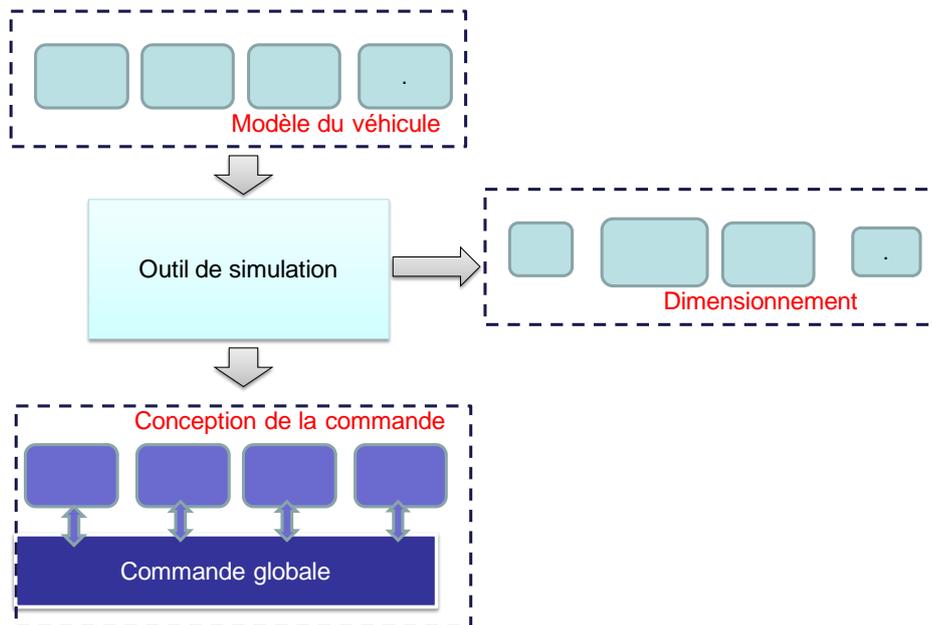


Figure 2-5 : Outil de simulation et finalités

Pour répondre à ces objectifs, la démarche choisie pour la construction du logiciel VEHLIB, l'outil de simulation des véhicules hybrides du LTE, s'est appuyée sur une description en schéma bloc associée à des principes issus de la théorie des Bond Graph. Le choix de la plateforme de simulation s'est porté sur Matlab/Simulink qui permet d'associer dans un même outil la représentation, les modèles et les algorithmes de résolution. Etant donné les moyens d'essais disponibles au LTE, la facilité d'utilisation de cet environnement pour des applications en temps réel a également fortement motivé ce choix (notamment pour les applications de type « HIL », voir § 2.4.2). Après plus de 10 ans de capitalisation de modèles et de données, ce choix, même s'il suivait la tendance de l'époque et qu'il ne séparait pas les étapes décrites au § 2.2.1.2, nous paraît encore légitime étant donné les possibilités de couplages de l'environnement Matlab/Simulink avec des outils divers.

### 2.3.2 Approche mixte bond graph/schéma bloc

Il s'agit ici de coupler un formalisme qui s'appuie sur les principes des Bonds Graph à une représentation graphique qui repose sur les schémas blocs. En effet les principes de conservation de l'énergie, de variables d'effort et de flux ainsi que la causalité sont ceux énoncés par la théorie des Bonds graph. En revanche la représentation du système en sous systèmes élémentaires fera appel à une représentation graphique sous la forme de schémas blocs avec des ports d'entrées/sorties représentant essentiellement les variables d'effort et de flux. Cette représentation permet l'utilisation de l'environnement de type fonctionnel (Matlab-simulink) tout en ayant une approche structurée.

Le sens de la flèche indiquera la causalité, c'est à dire l'élément qui impose l'effort et l'élément qui impose le flux (Gawthrop & Bevan 2007).

Nous distinguerons trois types de sous-systèmes dont la représentation en schéma bloc est la suivante (Figure 2-6).

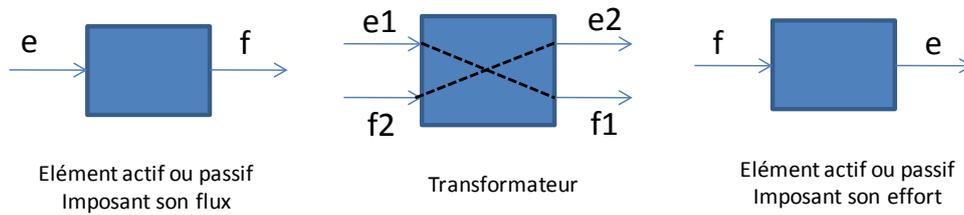


Figure 2-6 : Représentation par Schémas blocs des sous-systèmes.

Il faut préciser ici que le sens des flèches indique la causalité (imposition d'effort ou de flux) et non forcément le sens du flux d'énergie. Ce dernier sera donné par le signe du produit des deux quantités algébriques  $e$  et  $f$  moyennant une convention fixée à priori.

Remarquons qu'aucune marque distinctive ne différencie a priori une source d'effort d'un élément dissipatif qui impose son effort. La règle de causalité impose simplement l'association de deux sources ou de deux éléments dissipatifs de nature différente. Notons que tel est le cas dans les circuits électriques où l'on ne connecte pas directement en parallèle deux sources de tensions ou en série deux sources de courants.

En l'absence de conflit d'association, la connexion entre des sous-systèmes de même domaine se fait simplement en connectant les ports de ceux ci en respectant la règle de causalité (Figure 2-7). En revanche, pour la connexion de deux sous systèmes de domaines différents, un transformateur d'énergie est nécessaire pour passer d'une forme d'énergie à l'autre. Notons que la notion de transformateur peut s'utiliser aussi pour une même forme d'énergie, la transformation n'affecte alors que le rapport entre les efforts d'entrée et de sortie (même rapport pour les flux) mais pas la nature de l'énergie (exemple : un réducteur mécanique).

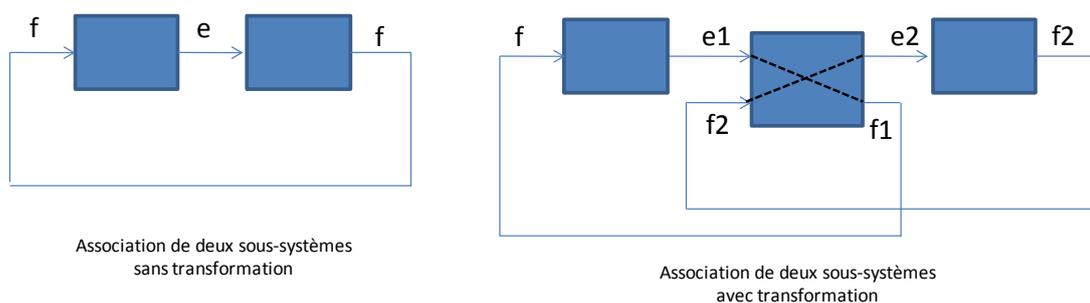


Figure 2-7 : Connexion entre les sous systèmes.

A ce stade qui concerne la représentation, nous ne nous occupons pas de la commandabilité au sens automatique du terme mais simplement pour indiquer s'il y a une action possible, notamment concernant les transformateurs d'énergie, pour que celui ci délivre une quantité souhaitée d'énergie. Nous rajouterons alors, dans le cas des organes dits commandables, une entrée en haut à gauche du schéma bloc correspondant à la demande.

### 2.3.3 La représentation retenue

Considérons un système représentant un véhicule hybride parallèle en utilisant l'approche mixte schéma Bloc/ Bond Graph (Figure 2-8). Il est constitué des sous systèmes suivants :

- Un Accumulateur électrochimique : batterie ;
- Un transformateur électromécanique (moteur électrique avec son convertisseur commandable, appelé ACM : voir annexe 3 pour plus de détail) ;
- Un transformateur mécanique (réducteur) ;
- Un transformateur mécanique (embrayage) ;
- Un transformateur mécanique (boîte de vitesse) ;
- Une source mécanique : le moteur thermique ;
- Un consommateur mécanique (la caisse du véhicule avec son inertie mécanique et les forces de résistance à l'avancement) ;
- Un consommateur électrique (les accessoires électriques).

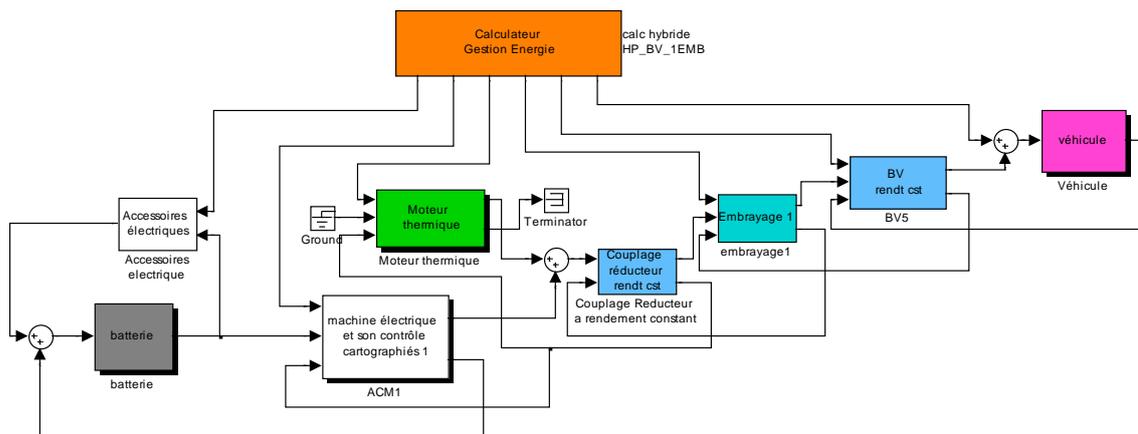


Figure 2-8 : Représentation graphique d'un modèle de véhicule hybride parallèle à un embrayage avec le formalisme de base.

La représentation du modèle ainsi constitué présente l'inconvénient d'une lisibilité réduite à cause des croisements des entrées/sorties des différents composants. Afin de réduire le nombre de connexions (notamment celles qui forment des boucles de retour) et d'avoir une apparence qui se rapproche le plus possible de la structure de la chaîne de traction : par exemple deux bornes de tension (+ et -) sur une batterie, un effort de traction et un effort de freinage appliqué au véhicule ..., on propose d'introduire les modifications suivantes :

- la transmission des flux entre les éléments se fait à l'aide d'un adressage sans fil apparent (possible grâce à l'option « go to » et « from » dans Simulink)
- l'effort électrique (tension) sera représenté par deux fils dans le cas d'une tension monophasé et trois fils dans le cas d'une tension triphasée.

Moyennant ces modifications le modèle du véhicule hybride devient celui présenté sur la Figure 2-9. La reconnaissance d'une architecture parallèle est dans ce cas plus immédiate.

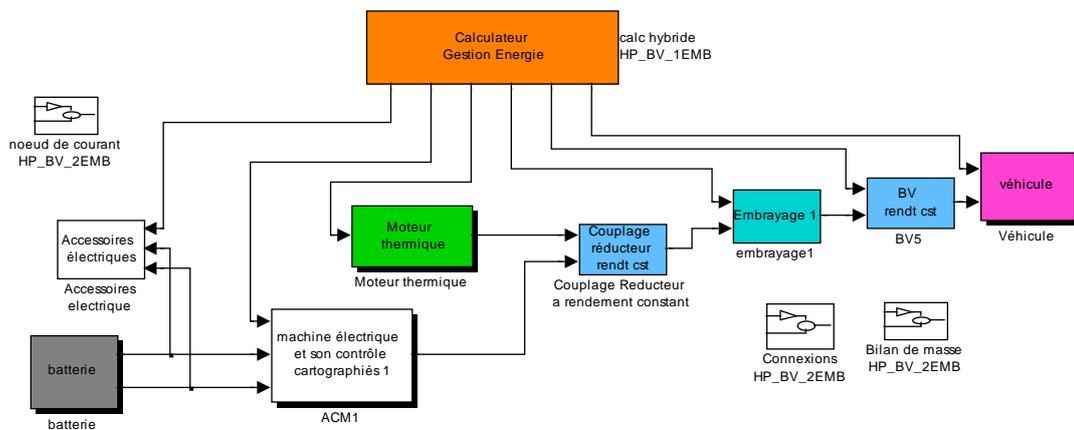


Figure 2-9 : Représentation graphique d'un modèle de véhicule hybride parallèle à un embrayage avec le formalisme modifié.

En revanche, pour chaque modèle de véhicule il est nécessaire de rajouter des blocs pour la connexion des variables flux (bloc de connexion mécaniques pour les vitesses et bloc correspondant aux nœuds électriques pour les courants).

C'est cette représentation qui a été retenue en 1998 pour le développement des modèles de composants et de véhicules dans VEHLIB.

### 2.3.4 Les modèles des sous-systèmes

Comme stipulé en début de chapitre, nous pouvons distinguer, dans une démarche systémique, la représentation d'un système de son modèle mathématique. De ce fait un même sous système pourra présenter plusieurs niveaux de modélisation tant qu'il respecte les variables d'entrée/sortie fixées par les règles de connexion du formalisme de représentation. On entend par niveau de modélisation, le degré de complexité du modèle (d'autres parlent de granularité) pour répondre à l'application souhaitée, selon les phénomènes pris en compte ou négligés (hypothèses relatives à chaque niveau). Dans l'annexe 3, cette approche de modélisation « multi-niveaux » est illustrée sur le cas particulier de l'organe moteur électrique associé à son convertisseur (ACM).

Dans la bibliothèque VEHLIB nous distinguerons plusieurs types de modèles.

#### 2.3.4.1 Le modèle de connaissance dynamique

Le modèle de connaissance dynamique représente le modèle le plus fin dans VEHLIB et est sensé reproduire, par des équations algèbro-différentielles, le comportement dynamique du système et de ses sous systèmes en tenant compte des phénomènes physiques de différents ordres. Le modèle de l'organe physique se trouve de ce fait dissocié de son actionneur et de sa logique de commande (voir annexe 3) qui représentent eux mêmes des sous-modèles du modèle de l'organe. Nous pouvons citer comme exemple un moteur électrique représenté par les équations électriques de tension, de courant et de leurs variations temporelles, ou une

batterie avec une description des phénomènes électrochimiques et de leurs évolutions dans le temps (phénomène de recombinaisons des charges pendant la période de repos de la batterie par exemple).

### 2.3.4.2 Le modèle de connaissance statique

Le modèle de connaissance statique est une simplification du modèle dynamique qui consiste à négliger certaines dynamiques. En effet, il utilise les équations du modèle mathématique représentant les phénomènes physiques, mais en régime stationnaire uniquement. De ce fait les variations en fonction du temps sont négligées.

### 2.3.4.3 Le modèle de comportement statique

Le modèle comportemental est utilisé ici au sens énergétique. A l'image d'une boîte noire, il ne fournit aucune explicitation mathématique des phénomènes physiques présents dans le système, mais simplement une quantification numérique (table de points mesurés) ou analytique (identifié d'une manière empirique) de ses pertes selon l'effort et le flux considérés. Etant donné l'objectif supplémentaire de pouvoir quantifier les performances maximales (cahier des charges dynamique du véhicule), nous ajouterons à cette représentation énergétique une caractéristique de l'effort maximal en fonction du flux ou inversement. Nous aboutissons ainsi à ce qu'on appelle couramment dans le milieu automobile une « cartographie » de perte, de rendement ou de consommation du système, délimitée par sa zone de performances maximales. Nous pouvons représenter ceci sous forme d'iso-valeurs de pertes ou de rendement, comme c'est sur le graphe de la Figure 2-10.

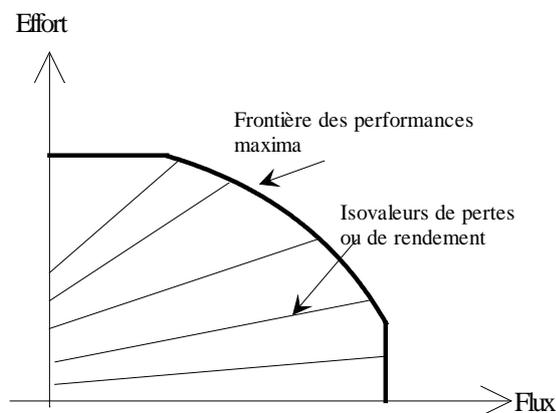
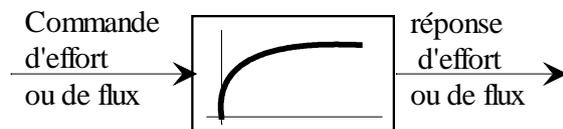
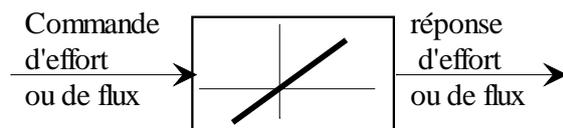


Figure 2-10 : Cartographie des pertes et frontières maxima dans le domaine effort/flux



a) retard de premier ordre



b) limiteur du taux d'accroissement ( $d/dt$ )

Figure 2-11 : Retard imposé à la variable commandée

Ce type de modèle est une représentation discrète et statique du système car les points d'effort et de flux mesurés, ou déduits d'un modèle plus fin, le sont en régime permanent et représentent une discrétisation (maillage) plus ou moins fine du domaine effort/flux selon le nombre de points pris en compte. Afin d'assurer une continuité dans les calculs, une interpolation linéaire est mise en œuvre dans le modèle pour estimer la valeur des pertes ou du rendement du point courant à partir des quatre points adjacents du domaine. Il est évident que cette interpolation introduit des imprécisions de calcul par rapport aux points mesurés, notamment dans les zones où le comportement du sous-système est fortement non linéaire. Pour augmenter la précision dans ces cas, on est souvent amené à augmenter le nombre de points de mesures (maillage plus fin du domaine effort/flux lors des essais).

#### **2.3.4.4 Passage des modèles statiques aux modèles quasi-statiques**

La simulation énergétique des véhicules hybrides impose de tenir compte, à minima, de la dynamique fondamentale liée au mouvement du véhicule. Certains modèles statiques ne nécessitent pas de modification spéciales du moment où la réponse des variables d'effort ou de flux est suffisamment rapide par rapport à la dynamique fondamentale. En revanche, certains sous-systèmes disposent de temps de réponse comparable à la constante de temps mécanique du véhicule. Dans ce cas, il est possible d'introduire une « pseudo-dynamique » en imposant à la variable effort ou flux de répondre avec un retard éventuellement paramétrable et identifié expérimentalement ou par des modèles plus fins.

L'effet de retard sur la réponse par rapport à la commande peut être représenté de deux façons sous Simulink (Figure 2-11) à savoir :

- une fonction de transfert de 1<sup>er</sup> ou 2<sup>nd</sup> ordre,
- un limiteur de dérivée (« rate limiter »)  $d/dt=cst$ .

#### **2.3.5 Les modèles inverses associés à VEHLIB**

Afin de pouvoir étudier et mettre en œuvre la commande globale des véhicules hybrides ainsi que l'aide au dimensionnement des composants nous utilisons également des modèles inverses qui permettent à partir de la mission du véhicule de remonter aux conditions de fonctionnement des composants. Par rapport à un modèle direct le modèle inverse permet :

- De respecter strictement la cinématique demandée sans passer par des régulateurs ou par un modèle de conducteur. Ceci permet notamment de s'affranchir des disparités introduites par le suivi de cycle dans des phases d'évaluation comparatives ;

- D'utiliser des méthodes d'optimisation de la gestion de l'énergie qui manipulent des variables précises pas nécessairement imposables sans asservissement supplémentaire dans le modèle direct (comme le courant de la batterie par exemple) ;

- D'augmenter le pas de calcul pour des raisons de mémoire disponible pour certaines méthodes d'optimisation sans compromettre les boucles de régulations (car il n'y en a pas) comme c'est le cas sur le modèle direct.

Pour cela le principe est simple. La causalité des modèles est inversée pour que, à partir des effets on remonte aux causes. Le calcul est effectué dans le sens ascendant, c'est-à-dire depuis les roues du véhicule jusqu'aux efforts et flux des composants. Le couple à la roue n'est plus le résultat des commandes des moteurs et des freins, mais est imposé par le calcul de l'accélération à partir de la vitesse (Figure 2-12).

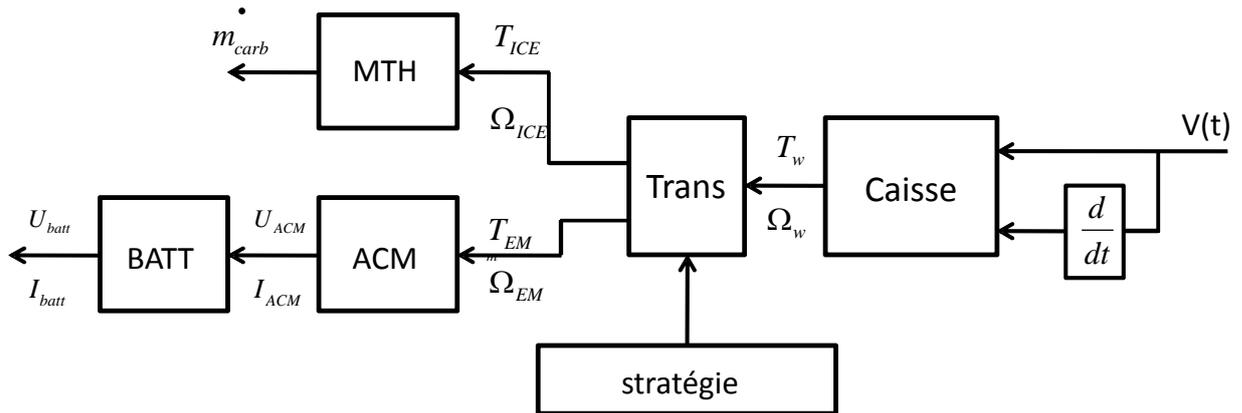


Figure 2-12 : Schéma du modèle inverse utilisé pour un véhicule hybride parallèle

Le premier outil de l'équipe basé sur la modélisation inverse date des années 1990, c'est-à-dire bien avant VEHLIB. Appelé VERT, ce logiciel a été écrit en Fortran et permettait de simuler des véhicules thermiques, électriques et hybrides séries pour une évaluation énergétique (F. Badin et al. 1996).

Après le développement de VEHLIB, et suite aux besoins de développement de la gestion de l'énergie optimale, J. Scordia a mis en œuvre au cours de sa thèse (Julien Scordia 2004) un outil basé sur la modélisation inverse et utilisant le langage C. Le maintien et la communication entre deux outils sur des plateformes différentes se sont avérés difficiles au cours des années. Une réécriture du modèle inverse avec les algorithmes d'optimisation associés a été réalisée sous Matlab par les membres de l'équipe pour intégration dans VEHLIB.

## 2.4 Exemples d'application

### 2.4.1 Synthèse d'un modèle de véhicule hybride série parallèle avec train épicycloïdal. Validation avec le véhicule Toyota Prius.

#### 2.4.1.1 Objectif

L'architecture hybride série parallèle est l'une des architectures hybrides les plus complexes. L'existence d'un véhicule hybride de référence disposant de cette architecture, la Prius de Toyota, et son test pour évaluation au banc à rouleau du LTE a motivé l'établissement d'un modèle sous VEHLIB. Ce modèle validé par expérimentation a permis de conférer aux modèles des composants et leurs interactions une validité expérimentale sur la quelle l'étude d'autres architectures et dimensionnements peuvent être basés.

#### 2.4.1.2 Modèle de la batterie

La modélisation des batteries dans l'approche systémique pour la simulation des véhicules hybrides représente un point clé et délicat à la fois. La complexité des phénomènes électrochimiques qui régissent le fonctionnement de ces accumulateurs et le nombre de

paramètres à prendre en compte rendent l'établissement d'un modèle précis une tâche difficile. Une approche structurale cartésienne pour ce type de modélisation aboutirait à des modèles comme ceux dit « au  $cm^2$  » utilisés dans le programme Predit SIVTHEC (F. Badin et al. 2000) difficiles à renseigner et quasi inutilisables dans une simulation sur un cycle d'usage de véhicule.

La systémique peut jouer ici un rôle important en rappelant que le modèle du système est dicté par le concepteur selon les choix de ses finalités et non pas par le système lui-même.

Dans le cadre de la simulation énergétique des véhicules hybrides, il s'est avéré utile et pratique de s'appuyer sur des modèles de batterie de type circuit électrique équivalent. Cette tendance peut être justifiée par deux raisons. La première est la nature électrique de la puissance fournie qui se décline selon les variables effort et flux (ou action réaction) dans toutes les représentations et modélisations par une tension et un courant. La deuxième est l'adoption par la communauté du génie électrique de la thématique « stockage de l'énergie » avec un intérêt croissant ces dix dernières années. Les techniques d'identification des paramètres électriques furent alors adaptées pour le cas des sources d'énergie à l'image des batteries, des supercondensateurs ou des Piles A Combustible (M. Montaru & Pelissier 2008) (Boulon 2009), (Gauchia 2009).

Dans VEHLIB, à l'image des modèles de l'Association Convertisseurs Machine électrique, nous avons opté pour distinguer plusieurs niveaux de modèle de batterie. Ces modèles ont été développés dans l'équipe VEH du LTE, et ont profité de la contribution de chercheurs (F. Badin et al. 2004), (Pelissier 2010) de doctorants (Maxime Montaru 2009), (Anne Laure Allègre 2010), de post-doctorants (Emmanuel Vinot et al. 2008) et de stagiaires (Peters 2010).

Je me considère ici comme utilisateur averti de ces modèles auxquels ma contribution reste très limitée. Les différents niveaux de modèle de la batterie utilisés dans VEHLIB sont donnés dans l'annexe 4. A titre d'exemple, nous présentons les deux modèles les plus utilisés sur la Figure 2-13 pour le modèle statique et la Figure 2-14 pour le modèle dynamique.

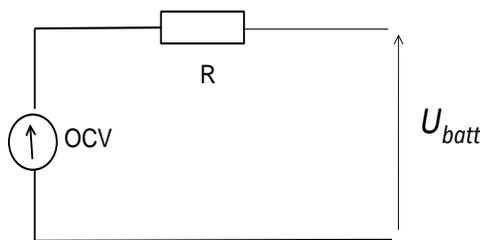


Figure 2-13 ! Modèle statique de la batterie

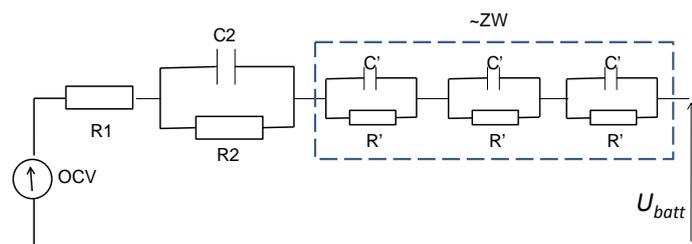


Figure 2-14 : Modèle dynamique de la batterie

#### 2.4.1.2.1 L'estimation de l'état de charge

Comme nous l'avons évoqué au chapitre 1, l'estimation de l'état de charge de la batterie est une tâche délicate car plusieurs paramètres doivent être pris en compte dont certains comme le vieillissement est aujourd'hui encore non maîtrisé. Cette estimation peut s'appuyer sur des techniques avancées basées notamment sur les méthodes du filtre de Kalman (Plett 2004), mais nécessite dans tous les cas une bonne connaissance préalable des caractéristiques de la batterie, voire un modèle fiable et précis.

Nous n'allons pas nous étendre le long de ces travaux sur cet aspect qui constitue à lui seul une thématique de recherche. La méthode que nous utiliserons dans les simulations et les essais réalisés au banc moteur est basée simplement sur un comptage coulométrique avec la prise en compte d'un rendement Faradique éventuel dans les phases de recharge. L'état de charge en % considéré dans toute la suite est donné par l'expression :

$$Soc(T) = Soc(t_0) - \frac{100 \int_{t_0}^T I_{bat}(t) \eta_F dt}{3600 C_n} \quad (2-1)$$

Avec  $C_n$  la capacité nominale de la batterie exprimée en Ah,  $\eta_f$  le rendement Faradique en recharge.

### 2.4.1.3 Modèle du véhicule hybride série-parallèle

Nous n'allons pas détailler dans ce qui suit les différents modèles qui ont servi à la synthèse du modèle global du véhicule, mais nous exposerons plutôt l'historique de ce modèle et de sa validation. Pour plus de détail, le lecteur pourra consulter les références suivantes (B. Jeanneret et al. 1999), (Rochdi Trigui et al. 2004)

La première modélisation sous VEHLIB du véhicule hybride série parallèle avec une transmission mécanique utilisant un train épicycloïdal a été réalisée dans l'équipe en fin des années 90 (B. Jeanneret et al. 1999). Elle a été validée ensuite sur le premier véhicule hybride, la Prius de Toyota dans sa toute première version mise sur le marché Japonais en 1997. Un véhicule de ce type a été acquis et testé sur le banc dynamométrique du LTE dans le cadre du programme EVALVH financé par l'ADEME (B. Jeanneret & Harel 1999).

La Figure 2-15 et la Figure 2-16 montrent la représentation du véhicule sous VEHLIB et les résultats de simulation et de mesure comparés sur le cycle normalisé japonais 10-15 modes.

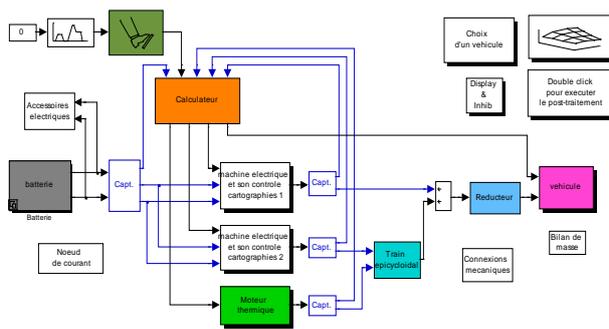


Figure 2-15 : Schéma du modèle du véhicule Prius I 1997 (Japon) sous VEHLIB

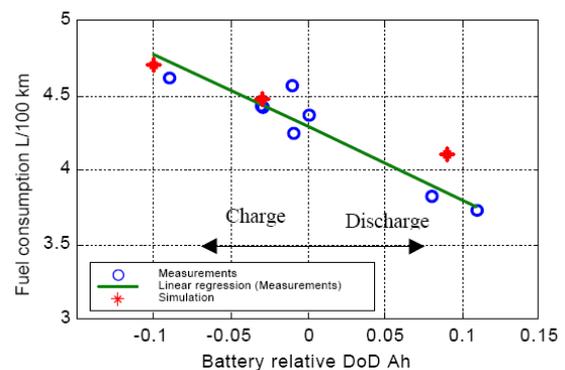


Figure 2-16 : Résultats de mesures et de simulation de la consommation selon la décharge relative de la batterie (cycle 10-15 mode)

Dans le cadre du même programme EVALVH étendu, le véhicule Toyota Prius de deuxième génération (Prius II) commercialisé en Europe a été également testé. Le modèle sous VEHLIB a été réactualisé avec les nouvelles données (Emmanuel Vinot et al. 2008), (E. Vinot et al. 2006). A noter spécialement, dans cette nouvelle version, l'introduction d'un hacheur survolteur entre la batterie et le bus continu (Figure 2-17). Nous pouvons noter ici

l'efficacité d'utiliser l'approche systémique avec une bibliothèque de modèles et de données qui permet une modification rapide de la configuration hybride.

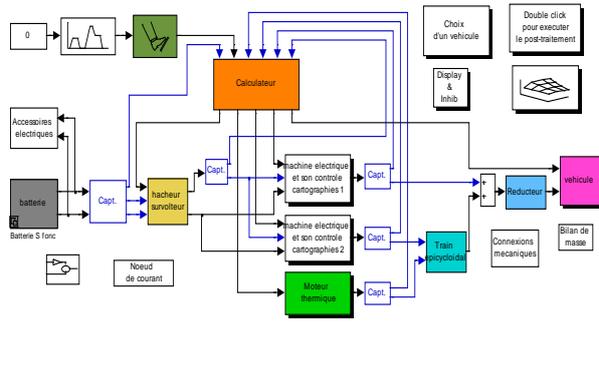


Figure 2-17 : Schéma du modèle du véhicule Prius II 2004 (Europe) sous VEHLIB

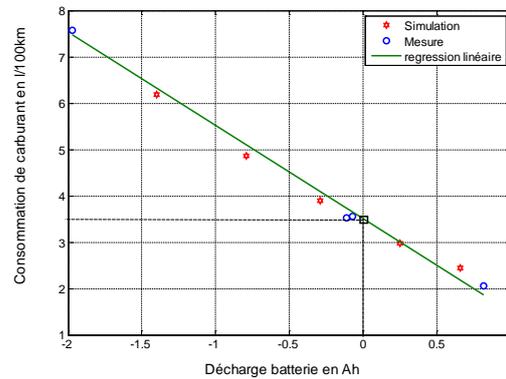


Figure 2-18 : Résultats de mesures et de simulation de la consommation selon la décharge relative de la batterie (cycle 10-15 mode).

Pour les deux modèles, une loi de gestion de l'énergie basée sur des règles expertes utilisant une technique de suivi de puissance (voir chapitre 3) a été utilisée (B. Jeanneret et al. 1999), (Emmanuel Vinot et al. 2008). Les paramètres les plus influents de cette gestion ont été identifiés sur le banc d'essai à l'aide d'essais spécifiques (B. Jeanneret & Harel 1999), (E. Vinot et al. 2006).

A titre d'exemple de validation, des résultats instantanés représentant l'évolution de l'état de charge de la batterie mesurés et simulé de la Prius II sont représentés sur la Figure 2-19. Le démarrage et l'utilisation du moteur thermique, dans les deux cas de mesures et de simulation, est montré sur la Figure 2-20 pour le même cycle 10-15 mode.

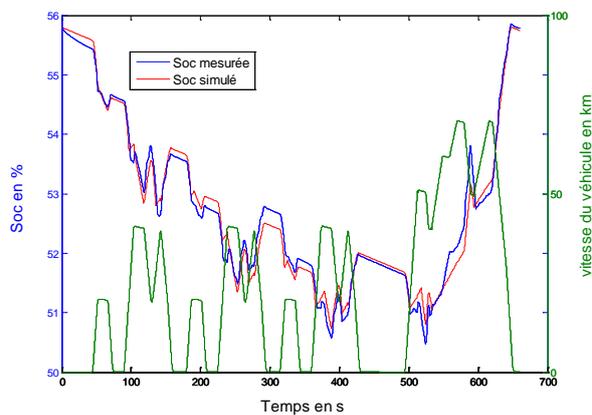


Figure 2-19 : Evolution de l'état d charge simulé et mesuré de la Prius II sur le cycle 10-15 mode.

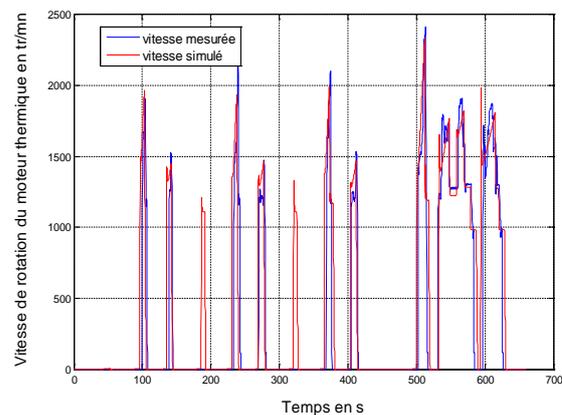


Figure 2-20 : Vitesse de rotation du moteur thermique simulée et mesurée de la Prius II sur le cycle 10-15 mode.

De la Figure 2-19 et la Figure 2-20, nous pouvons conclure à une réponse correcte du modèle de simulation. Malgré des différences instantanées sur le mode de fonctionnement (la simulation fait démarrer le moteur thermique aux instants 190s et 320s mais pas les mesures), l'état de charge et la consommation globale simulée sur le cycle restent proches des mesures (3,42 l/100 km en simulation contre 3.51 l/100 km pour les mesures à bilan batterie nul).

## 2.4.2 Emulation temps réel de véhicules hybrides utilisant VEHLIB

### 2.4.2.1 Principe

La base de l'émulation du véhicule hybride décrite ici utilise le principe du composant dans la boucle (« Hardware In the Loop »). Cette technique, d'abord développée pour tester des composants électroniques (principalement des calculateurs) (Dufour & Bélanger 2005) a ensuite été appliquée à des systèmes d'électroniques de puissance (Steurer 2006) puis sur des systèmes complet comme des chaînes de traction électriques (Verhille et al. 2007), (Oh 2005), des systèmes de génération d'énergie éolienne (Munteanu et al. 2010), (A. Bouscayrol et al. 2009), (H. Li et al. 2006) ou des systèmes de traction hybrides (Y. Cheng et al. 2007), (Oh & A. Emadi 2004), (Xiaoming et al. 2006). Une classification de ces différentes utilisations de la technique HIL a été présentée dans (A. Bouscayrol 2008).

L'expérimentation HIL se compose généralement d'une partie logicielle contenant les modèles des éléments émulsés, de composant réels en test et de cartes d'acquisition/commande permettant la communication entre la partie logicielle et la partie en test. Les objectifs de ces applications peuvent être divers comme la validation des communications et des signaux, des lois de commande ou aussi du comportement d'un sous-système complexe et son évaluation comme c'est le cas de la chaîne de traction hybride. Cette dernière option, objet des travaux ici, permet des économies de temps et de coût pour mettre en œuvre et évaluer des composants et des lois de gestion de l'énergie avant l'étape de prototype complet du véhicule. Certaines expérimentations HIL travaille à échelle réduite pour des raisons de moyens expérimentaux. L'expérimentation présentée ici est réalisée à l'échelle 1.

### 2.4.2.2 Emulation temps réel du véhicule hybride

Le banc d'essai moteur du LTE, décrit en annexe 5, est à la base un banc industriel pour test de moteur thermique constitué d'une machine asynchrone de 120 kW permettant d'appliquer un couple dynamique de +/- 250 Nm avec un temps de réponse de quelques ms. Une chaîne de traction hybride parallèle à deux embrayages a été implantée en configuration HIL comme présenté sur le schéma de la Figure 2-21 (B. Jeanneret et al. 2004).

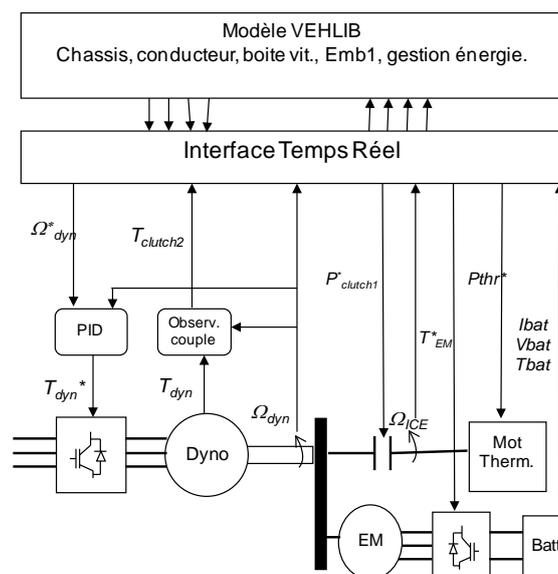


Figure 2-21 : Schéma de l'implantation de la configuration hybride parallèle au banc d'essai

Pour cette configuration hybride le Tableau 2-4 résume les éléments simulés et les éléments présents sur le banc.

Tableau 2-4 : Les organes émulés et les organes en test sur le banc d'essai hybride.

Eléments émulés	Eléments en test sur le banc
Forces véhicule (inertie et loi de route)	Moteur thermique (DCI 1.5 l)
Boîte de vitesse	Moteur électrique
Embrayage 1	Batterie ou super-condensateur
Conducteur	Embrayage 2
Calculateur (gestionnaire de l'énergie)	

Une version temps réel de VEHLIB permet de réaliser le portage des modèles en configuration HIL en remplaçant les modèles des composants à tester par une interface assurant la communication avec ces composants. (Figure 2-22 et Figure 2-23).

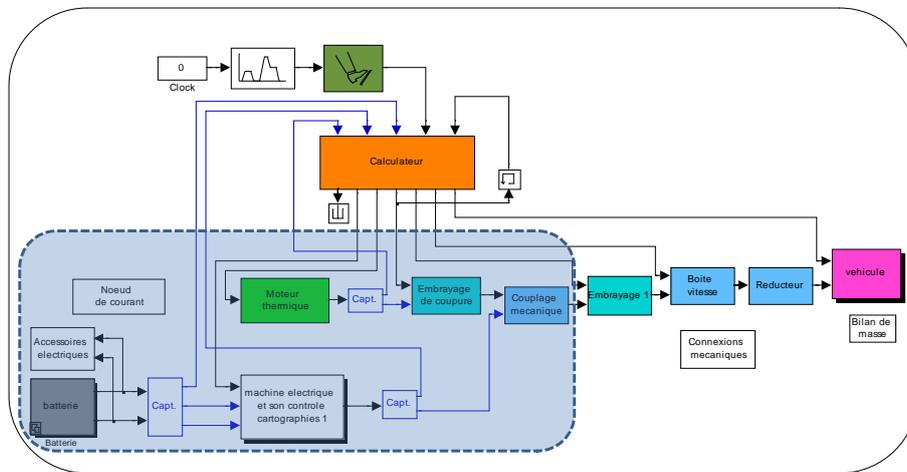


Figure 2-22 : Schéma du modèle de simulation sous VEHLIB du véhicule hybride parallèle à deux embrayages

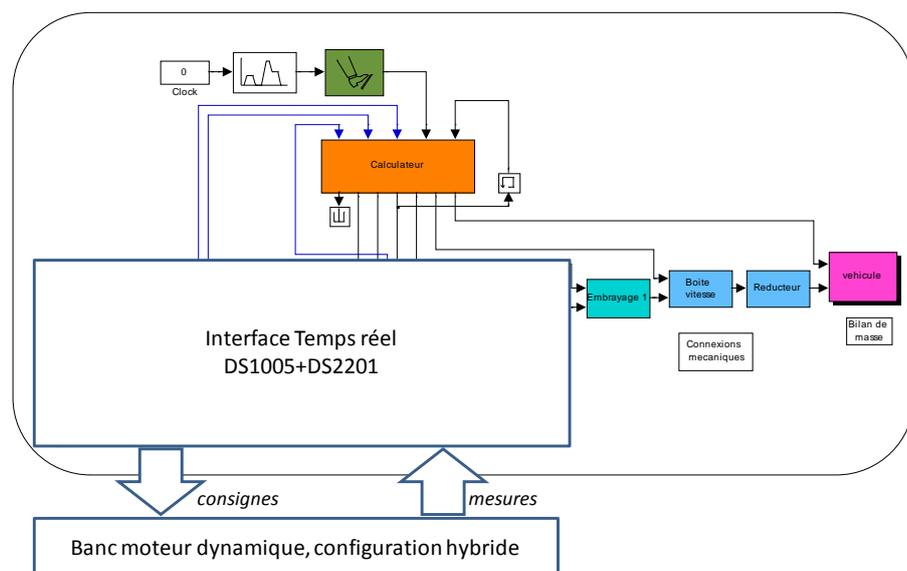


Figure 2-23 : Schéma du modèle temps réel du véhicule hybride avec gestion interfacée des composants présents sur le banc.

En utilisant des cartes dSpace (DS2201+DS1005), la compilation et le téléchargement du modèle permet les échanges des signaux d'interface entre la simulation temps réel et les composants en test.

Un véhicule thermique diesel dont les caractéristiques sont résumées sur le Tableau 2-5 est pris comme véhicule de référence. Le véhicule hybride émulé aura la même architecture présentée ci-dessus et les mêmes composants de base que le véhicule de référence. Les composants additionnels nécessaires à l'hybridation sont détaillés dans le Tableau 2-6 et permettent de réaliser trois configurations hybrides différentes selon les composants utilisés.

Tableau 2-5 : Caractéristique du véhicule hybride émulé

	value	unit		value	unit
<b>Chassis</b>			<b>Embrayge</b>		
Masse	780	kg	Rayon	0.1	m
Sf	1.89	m2	coeff. Frict.	0.28	/
Cx	0.35	/	<b>MT</b>		
Coef roul.	0.0106	/	type	Diesel CIDI	
<b>Roues</b>			Cylind.	1500	.cc
Nombre	4	/	Puiss Max.	60 @4000	kW@rpm
Inertie	0.7	Kgm2	Vit max	5000	rpm
rayon	0.28	m			
<b>Boîte de vitesse</b>			<b>Boîte de vitesse</b>		
.	rapport	rendement	.	rapport	rendement
1 <sup>er</sup> R	3.72	0.90	4 <sup>eme</sup> R	0.97	0.98
2 <sup>nd</sup> R	2.05	0.97	5 <sup>eme</sup> R	0.75	0.98
3 <sup>eme</sup> R	1.32	0.98	Diff	3.29	0.97

Tableau 2-6 : Caractéristiques des composants additionnels de chaque configuration testée

<b>Configuration I</b>	
Moteur alternateur à griffe	Valeo, 8 kW.
Batterie	Exide, PbAc 42V, 34Ah.
<b>Configuration II</b>	
Moteur alternateur double excitation	Valeo, 15 kW.
Batterie	Saft, NiMh 42V, 31Ah.
<b>Configuration III</b>	
Moteur alternateur double excitation	Valeo, 15 kW.
Supercapacité	Maxwell 144F, 48V

La stratégie de gestion de l'énergie utilisée est la même pour les trois configurations avec une adaptation pour le cas des super-condensateurs. Cette stratégie sera expliquée plus en détail au chapitre 3.

### 2.4.2.3 Résultats d'expérimentation

Comme exemple de résultats expérimentaux, nous analysons ici le comportement de la batterie Pb-Acide de la configuration I. La Figure 2-24 représente une séquence urbaine du cycle NEDC réalisé avec le véhicule émulé. Le couple de la machine électrique demandé par la gestion de l'énergie et celui réellement réalisé montrent une limitation dans la réponse. Cette limitation provient de l'acceptabilité de charge de la batterie Pb-acide très limitée pour ce couple électrochimique. La Figure 2-25 illustre la montée de la tension de la batterie au cours de la récupération de l'énergie, tension limitée par le BMS pour éviter les phénomènes de dégagement de gaz.

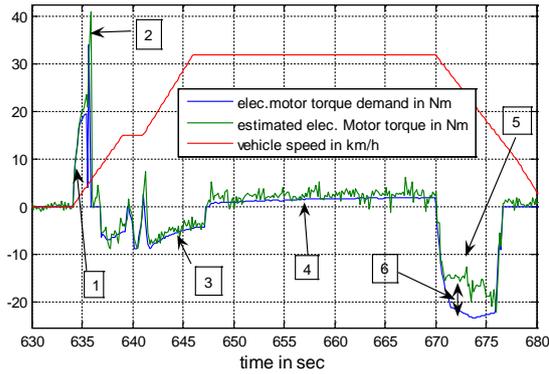


Figure 2-24 : Consigne et réponse du couple de la machine électrique

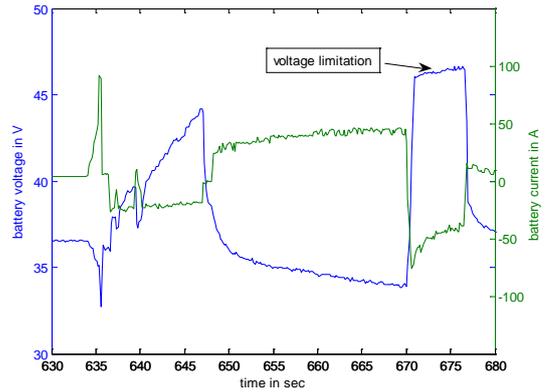


Figure 2-25 : Variation de la tension et du courant de la batterie

Plus de résultats seront donnés dans le chapitre 3 après l'exposition des lois de gestion de l'énergie mises en œuvre.

### 2.4.3 Modèle inverse d'un véhicule hybride série

L'utilisation des modèles inverses associés à VEHLIB permet de simuler un véhicule sur un profil de vitesse pour évaluer son potentiel énergétique. Cette simulation peut servir pour la conception de la commande globale comme nous le verrons au chapitre 3, ou pour l'aide au dimensionnement détaillée au chapitre 4.

Le schéma de la Figure 2-26 représente le modèle inverse d'un véhicule hybride série. Le véhicule simulé est un microbus de 5 t dont les caractéristiques sont données en annexe 6.

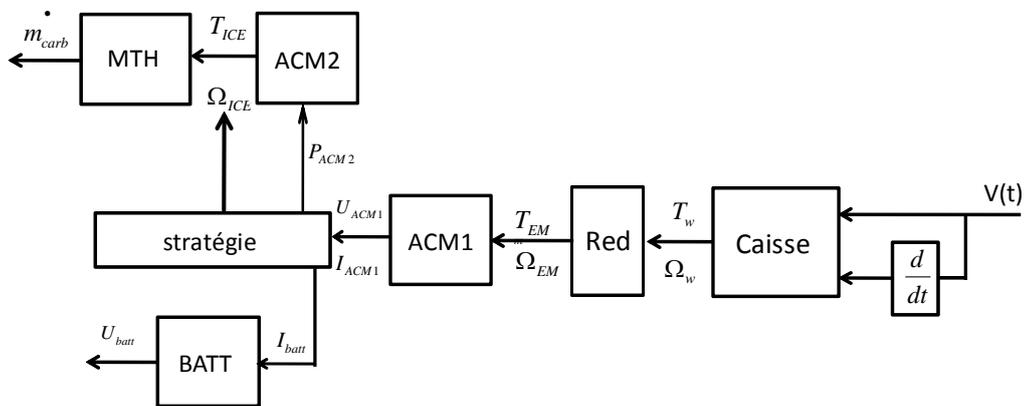


Figure 2-26 : Schéma du modèle inverse du véhicule hybride série

L'entrée des simulations est le profil de vitesse en fonction du temps. Dans ce cas il s'agit d'enregistrement sur la ligne de bus utilisé dans la ville de LAVAL (Majed Boujelben 2009).

La stratégie de gestion de l'énergie réalise le partage à chaque instant entre la puissance fournie par le groupe électrogène et celle fournie par la batterie. Cette stratégie utilise dans ce cas de simulation une stratégie d'optimisation globale à base de programmation dynamique (voir chapitre 3).

La Figure 2-27 présente des résultats de simulation concernant l'évolution de l'état de charge optimal théorique ainsi que le partage de puissance instantanée entre le moteur thermique et la batterie.

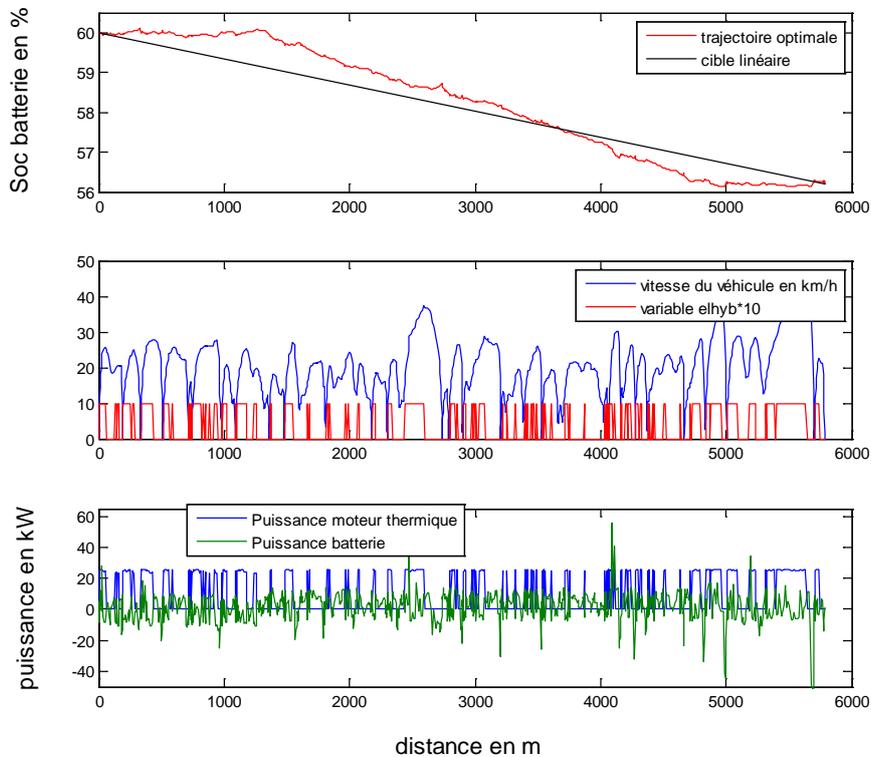


Figure 2-27 : Résultats de simulation utilisant le modèle inverse

Le cahier des charges de la simulation imposait à ce véhicule rechargeable d'amener la batterie à un état donné en fin du cycle. La décroissance optimale de l'état de charge obtenue n'est pas nécessairement linéaire comme le montre la partie supérieure de la Figure 2-27. Nous ne commenterons pas plus en détail ces résultats, la gestion de l'énergie fera l'objet de plus d'analyse au chapitre suivant. Nous pouvons juste constater la cohérence des puissances des deux sources avec la demande de vitesse et d'accélération du véhicule.

## 2.5 Ouverture vers la REM

### 2.5.1 Les limites de l'approche de l'outil unique

L'outil de simulation VEHLIB a permis de réaliser des modèles de différents véhicules hybrides avec différentes architectures et différentes données de composants. L'approche intégrée qui englobe l'étape de la modélisation, de la représentation et de la simulation numérique permet un gain de temps considérable. En revanche, cette approche a tendance à amener les concepteurs de modèles à concevoir la commande en même temps que le modèle. En l'absence d'outil qui permet une synthèse systématique de la commande, il est difficile de structurer dans ce cas les différents niveaux de commandes. Dans l'optique de l'étude de systèmes de plus en plus complexes (voir chapitre 5), séparer les différentes actions permet de dissocier les difficultés pour mieux gérer la complexité. Une utilisation de la REM dans le

cadre du réseau national MEGEVH a permis de tester une ouverture de VEHLIB vers cet outil de représentation. Les deux exemples qui suivent ont montré une bonne complémentarité et un apport structurant de la REM.

### 2.5.2 Multi-Modèle à commutation pour la simulation de l'embrayage

L'embrayage est un élément important dans les configurations thermiques conventionnelles et dans certaines configurations hybrides. Il permet de relier ou de déconnecter avec une dynamique rapide des arbres mécaniques. Cet élément représente une difficulté spéciale dans sa modélisation vu le comportement fortement non linéaire qui le régit. Dans le cadre d'une collaboration avec le L2EP de Lille au sein du réseau MEGEVH, la REM a été utilisée pour développer un modèle d'embrayage qui s'appuie sur le principe de la commutation de modèle (Walter Lhomme et al. 2008). Un nouvel élément, appelé aiguilleur a été alors introduit comme un nouveau pictogramme de base dans la REM. Cet élément permet d'activer une branche ou l'autre d'un modèle multi-branches (Figure 2-29).

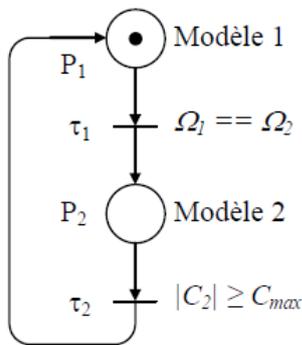


Figure 2-28 : Transitions entre les modèles

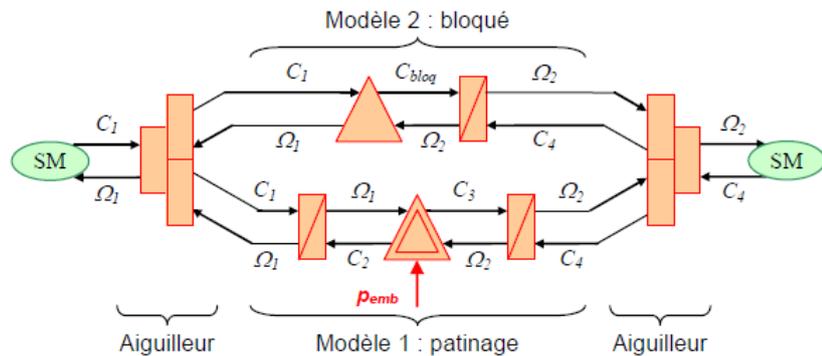


Figure 2-29 : REM du multi-modèle de l'embrayage

En effet, l'embrayage possède deux états : ouvert ou fermé. Quand celui-ci est ouvert (complètement ouvert ou en glissement), deux variables d'état représentées par les deux vitesses des arbres d'entrée et de sortie doivent être calculées. L'aiguilleur sélectionne alors le modèle correspondant à cet état (modèle 1 dans la Figure 2-29). Quand l'embrayage est fermé, le système ne présente plus qu'une seule variable d'état, les deux vitesses de chaque côté de l'embrayage étant égales. L'aiguilleur sélectionne alors le modèle de l'embrayage bloqué (modèle 2 sur la Figure 2-29). La logique de commutation est basée sur des tests sur les couples et les vitesses de chaque côté de l'embrayage. Un réseau de Petri a été utilisé pour commander les transitions comme c'est représenté sur la Figure 2-28.

Le modèle de l'embrayage et sa commande ont été ensuite validés dans une configuration thermique classique où le véhicule était émulé et où le moteur thermique et l'embrayage étaient présents sur le banc d'essai (W. Lhomme et al. 2011). Cette expérimentation a été réalisée sur le banc du LTE évoqué plus haut et dont une description plus détaillée est donnée en annexe 5. Les résultats de validation du modèle de l'embrayage sont donnés sur la Figure 2-30 pour les simulations et sur la Figure 2-31 pour les mesures.

Après la mise en œuvre du modèle de l'embrayage et de sa commande, il a été intégré dans un véhicule hybride parallèle à 1 embrayage dont le modèle sous VEHLIB est présenté sur la Figure 2-32. Les simulations ont montré une bonne concordance avec les résultats déjà

obtenus avec le modèle existant de l'embrayage (B. Jeanneret et al. 2004). Même si l'apport du multi-modèle reste plus évident au niveau de la structuration et de la synthèse de la commande, l'exemple de l'intégration réussie dans VEHLIB ouvre des voies d'échanges intéressantes avec la REM.

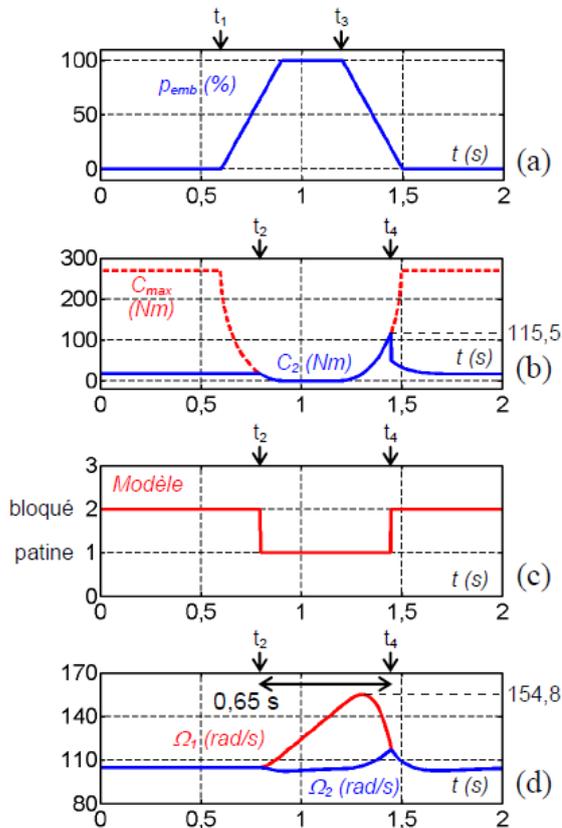


Figure 2-30 : Résultats de simulation d'une transmission avec embrayage : position de la butée d'embrayage (a), couple de l'embrayage et couple maximal de l'embrayage (b), modèle utilisé (c), vitesses de rotation (d)

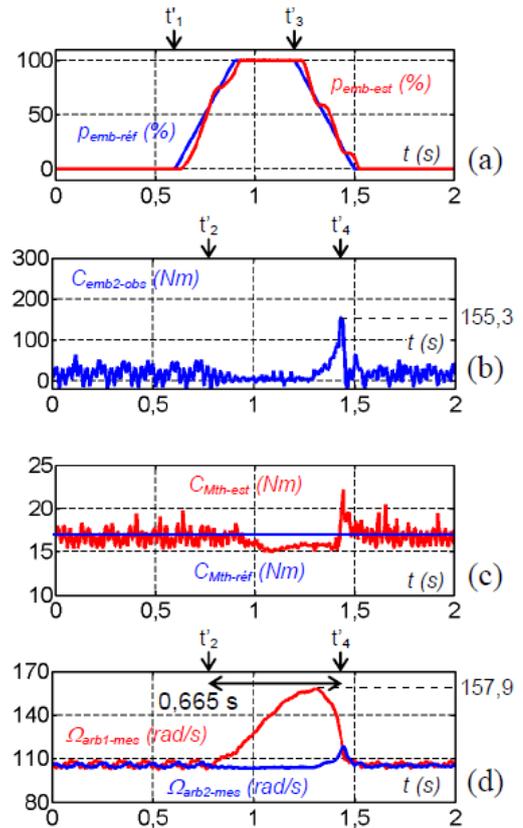


Figure 2-31 : Résultats d'expérimentation d'une transmission avec embrayage : position estimée et de référence de la butée d'embrayage (a) couple de l'embrayage observé (b), couple du moteur thermique estimé (c), vitesses de rotation mesurées (d)

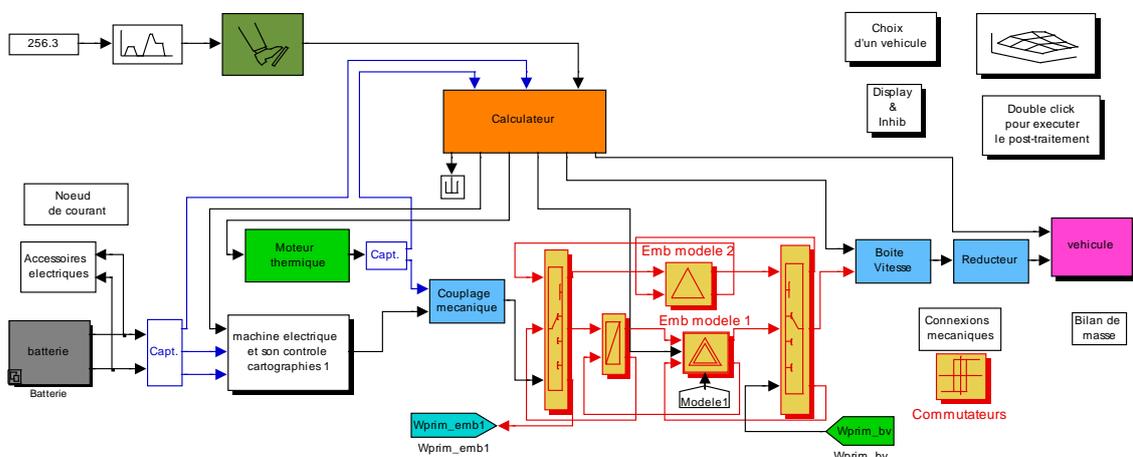


Figure 2-32 : Implantation du multi - modèle REM de l'embrayage dans VEHLIB

### 2.5.3 Commande par inversion de Modèle générique de véhicules hybrides

La Représentation Énergétique Macroscopique a été également utilisée, dans le cadre du réseau MEGEVH, pour étudier la possibilité de rendre générique et systématique la modélisation et la commande de différents véhicules hybrides. Dans ce cadre collaboratif, les travaux de K. Chen (Keyu Chen et al. 2009) ont montré que la configuration hybride série-parallèle contient implicitement les configurations série et parallèles si on élimine certaines connexions mécaniques (Figure 2-33).

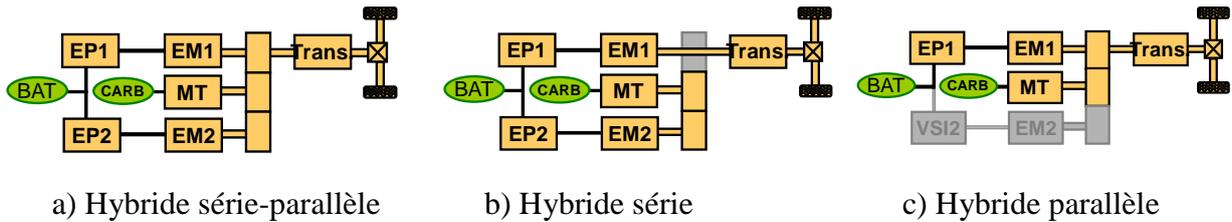
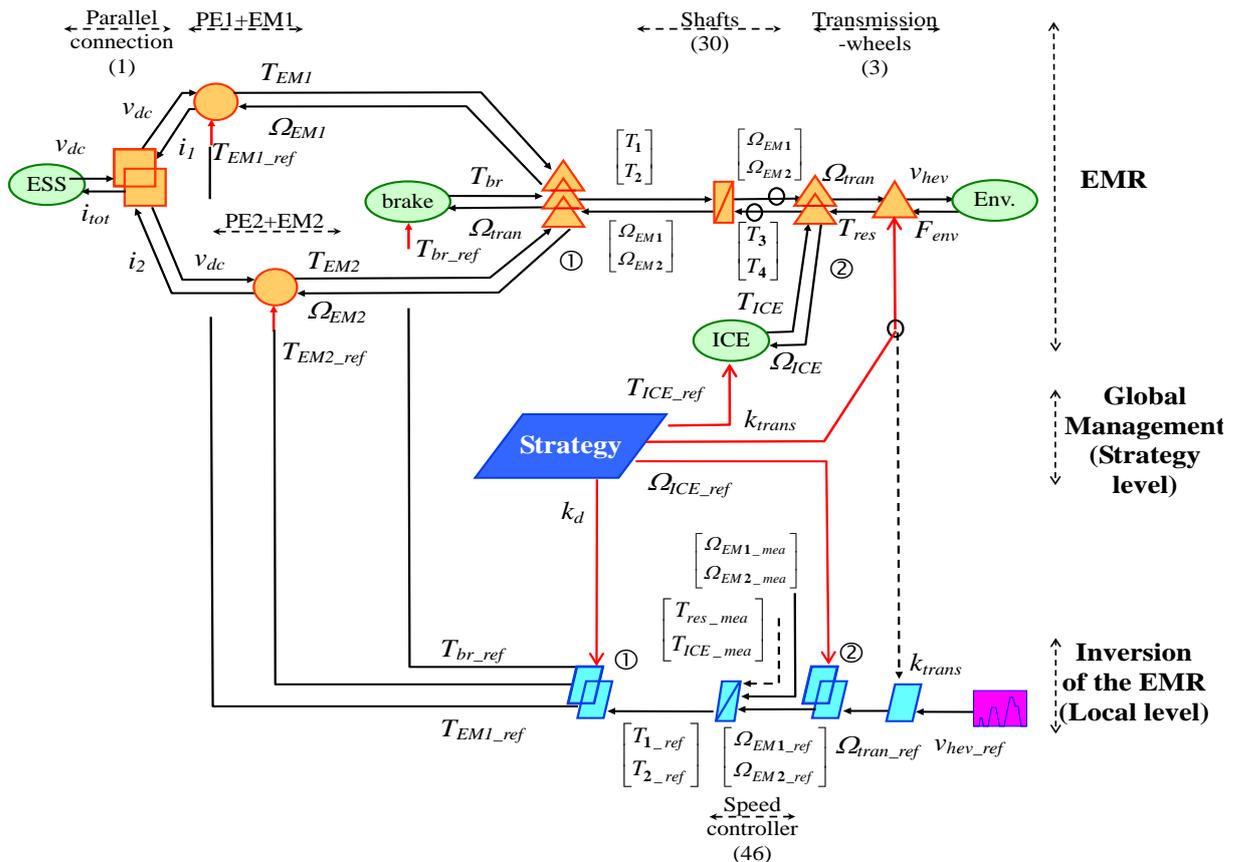


Figure 2-33 : Schéma générique du véhicule hybride

A partir de cette constatation, un modèle de véhicule hybride série parallèle a été réalisé en utilisant la REM (Figure 2-34).



Suite à l'inversion de modèle en utilisant la REM, une commande générique selon les paramètres de la configuration considérée a été déduite. Cette commande a été implantée dans

VEHLIB pour commander le modèle du véhicule hybride série parallèle présenté précédemment (modèle de la Prius II) (voir Figure 2-35).

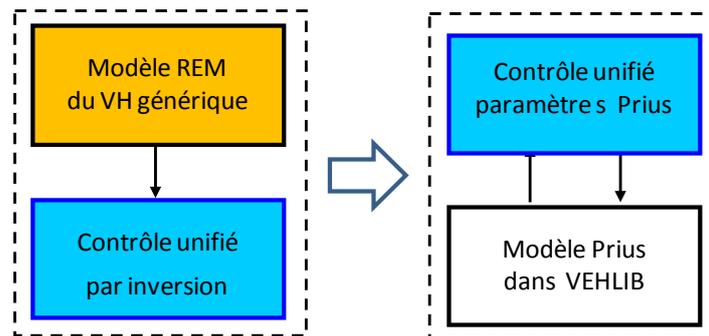


Figure 2-35 : Démarche d'implantation de la commande générique dans VEHLIB.

En utilisant une loi de gestion de l'énergie similaire à celle d'origine, la commande générique a montré un comportement conforme pour les différentes phases de fonctionnement du véhicule (Keyu Chen et al. 2010).

## 2.6 Conclusion

La complexité actuelle et future du véhicule hybride impose une approche structurée pour son étude et son optimisation. La systémique dont les principes constituent une aide précieuse pour l'organisation et la modélisation des systèmes complexes transdisciplinaires peut contribuer à la rationalisation de l'étude du véhicule hybride. Les représentations énergétiques et dynamiques disponibles permettent de structurer les modèles des sous-systèmes et de leurs interactions et possèdent chacune des spécificités propres à ses objectifs. Une approche intégrée pour la simulation des véhicules hybrides peut englober les étapes de modélisation et de représentation aboutissant à des logiciels plutôt de type structurel tel que VEHLIB. Cet outil de simulation, développé au LTE et permettant une synthèse assez rapide des topologies hybrides, a été validé avec des expérimentations réalisées sur des composants et sur des véhicules complets. Les modèles inverses utilisés dans VEHLIB contribuent au développement des commandes globales étudiées au chapitre suivant et à l'aide au dimensionnement des composants du véhicule, objet du chapitre 4. L'ouverture de l'outil de simulation à la REM a permis de mettre en évidence l'utilité d'une synthèse structurée et systématique de la commande. Les travaux futurs permettront d'harmoniser le lien entre les différents niveaux de commande comme il sera discuté au chapitre 5.



## **3 Chapitre 3 : Gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides**

### **3.1 Introduction**

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, la commande du véhicule hybride comporte plusieurs niveaux (cf. Figure 1-30). Un niveau global est en charge de relayer la demande du conducteur en termes de mouvement du véhicule et d'actionnement des auxiliaires. Ce niveau permet ensuite de répartir cette demande aux différentes sources d'énergie et de fournir la grandeur de référence aux différents actionneurs du véhicule. Un niveau local permet de communiquer avec la supervision globale pour accomplir les actions nécessaires à la réalisation des grandeurs de référence. La commande locale du moteur thermique traduit la demande de couple du superviseur par exemple en une consigne d'injection selon les différents paramètres du moteur. La commande locale de l'ACM (Association convertisseur Machine électrique) permet à partir de la consigne de couple (ou de vitesse) de réaliser, le plus souvent, des asservissements de courant dans la machine à partir de la gestion des interrupteurs du convertisseur. Dans des travaux antérieurs, nous avons étudié des commandes locales d'ACM asynchrone (Rochdi Trigui 1997) et synchrone à rotor bobiné (R. Trigui et al. 2001) pour des fins d'optimisation de l'énergie électrique consommée par ces machines. Dans ce chapitre nous présenterons les travaux concernant le niveau de commande global qui permet la gestion de l'énergie entre les sources du véhicule hybride.

Après la présentation des éléments de base et de l'état de l'art des méthodes utilisées dans la gestion de l'énergie, certaines de nos contributions sont détaillées. Ces contributions ont concerné dans un premier temps l'amélioration des lois de gestion à base de règles expertes et leur implantation en temps réel. Ces lois avaient l'avantage d'être simples à implémenter et robustes à l'usage, mais ne répondaient pas entièrement au problème de l'optimisation de l'énergie, nécessaire pour la viabilité des véhicules hybrides. Le co-encadrement d'une thèse avec le GREEN de Nancy (Julien Scordia 2004) a permis d'explorer la méthode de la programmation dynamique et son utilisation pour la génération de réseaux de neurones pour une application en ligne. Une autre méthode, basée sur le principe du minimum de Pontriaguine a fait l'objet d'une thèse co-encadrée avec le LAMIH de Valenciennes (Kermani 2009). Cette méthode a été adaptée pour une commande en temps réel validée expérimentalement et a conduit à des résultats proches de l'optimum visé.

### **3.2 Généralités et état de l'art**

#### **3.2.1 Position du problème**

Comme il a été explicité au chapitre 1, les modes de fonctionnement que permet la coexistence de deux sources dans un véhicule hybride thermique-électrique, depuis sa version légère (« Micro-hybrid ») jusqu'à celle complète (« Full-hybrid ») sont les suivantes.

- Arrêt démarrage (« stop/start »). Cette fonction permet, quand c'est possible, d'éteindre le moteur thermique à l'arrêt du véhicule. La consommation au ralenti sera ainsi évitée.
- Assistance électrique pendant les accélérations du véhicule (fonction dite « boost »).
- Récupération de l'énergie à la décélération (« electric braking »).
- Recharge des batteries à bord par le moteur thermique.

- Mode de traction en tout électrique.

Selon les architectures et le taux d'hybridation, ces fonctions peuvent être possibles ou pas et énergétiquement rentables ou pas. Il se pose ainsi le problème de la gestion de l'énergie instantanée pour activer l'une ou l'autre de ces fonctions.

Vue d'une manière plus globale, l'existence de deux sources d'énergie introduit un degré de liberté dans la commande du véhicule et permet de ce fait d'établir une ou plusieurs stratégies pour partager la demande du conducteur entre les deux sources. Cette stratégie doit répondre aux objectifs suivants :

- assurer le partage instantané de la puissance entre les deux sources pour répondre à la demande du conducteur,
- contrôler l'état de charge de l'élément de stockage.

### 3.2.2 La gestion de la batterie

Un des objectifs de la gestion de l'énergie est le contrôle de l'état de charge de l'élément de stockage. Cet objectif doit répondre à un choix préalable découlant du dimensionnement et de la possibilité de recharge extérieure (hybride rechargeable). Ce choix impose alors globalement une utilisation à charge flottante (« charge sustaining ») ou décroissante (« charge depleting »).

#### 3.2.2.1 Le contrôle en charge flottante (« charge sustaining »)

Quand le véhicule hybride est non rechargeable, l'état de charge de la batterie doit se maintenir avec les recharges à bord du véhicule. Ces recharges proviennent de l'énergie cinétique du véhicule pendant les phases de décélération ou du moteur thermique en utilisant la machine électrique en mode alternateur. La fenêtre de maintien de charge peut être au plus égale à  $\Delta Soc_{max} = Soc_{max} - Soc_{min}$ , mais est généralement beaucoup plus réduite pour des raisons de disponibilité de puissance et de durée de vie de la batterie. En effet, la puissance maximale de charge et de décharge de la batterie dépend directement du Soc (Belt et al. 2003). La Figure 3-1 représente la variation des deux puissances pour une batterie de type Li-Ion selon la profondeur de décharge de la batterie.

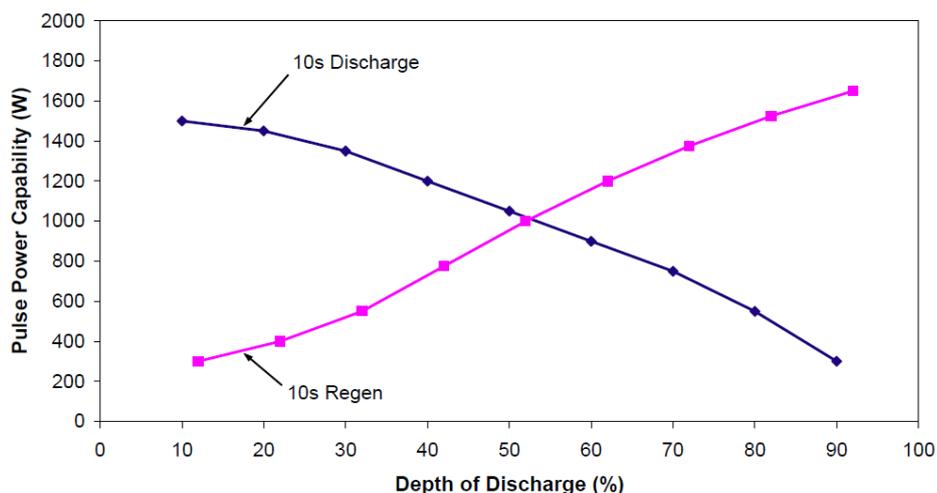


Figure 3-1 : Puissance maximale transitoire (10s) en charge et en décharge en fonction de la profondeur de décharge (INNEEL & DOE 2003).

Pour maintenir une puissance de charge et de décharge supérieure à une puissance donnée, il est impératif de réduire l'intervalle utile de Soc de la batterie en conséquence.

En ce qui concerne la durée de vie, il est admis aujourd'hui que la profondeur de la décharge par cycle ( $\Delta Soc$ ) accélère le vieillissement de la batterie pour une utilisation donnée (Belt et al. 2003). Il a été constaté, en corrélation avec ces propos, que les premiers véhicules hybrides mis sur le marché en fins des années 90, tous non rechargeables, réalisaient sur un cycle de 20 min (une dizaine de km) des incursions de  $\Delta Soc$  rarement supérieures à 10 % de la capacité totale de la batterie (R. Trigui et al. 2003). Nous verrons dans le chapitre 5 la modification éventuelle des critères d'optimisation pour tenir compte de ce paramètre.

### 3.2.2.2 Le contrôle en charge décroissante (« Charge depleting »)

La charge décroissante (ou « charge depleting ») consiste à laisser décroître le Soc de la batterie au cours de l'utilisation jusqu'à une valeur minimale en fin de cycle. Cette option est surtout utilisée pour la gestion de la batterie dans les véhicules hybrides rechargeables. En revanche, il n'est pas exclu qu'un véhicule hybride non rechargeable puisse traverser une portion ZEV (« Zero Emission Vehicle ») et réaliser de ce fait une décroissance de charge passagère. Ceci implique tout de même que la batterie soit dimensionnée en énergie en conséquence. Nous reviendrons sur cet aspect dans le chapitre 4.

Dans la littérature, on distingue souvent 3 zones dans la gestion du Soc de la batterie d'un véhicule hybride rechargeable (Figure 3-2).

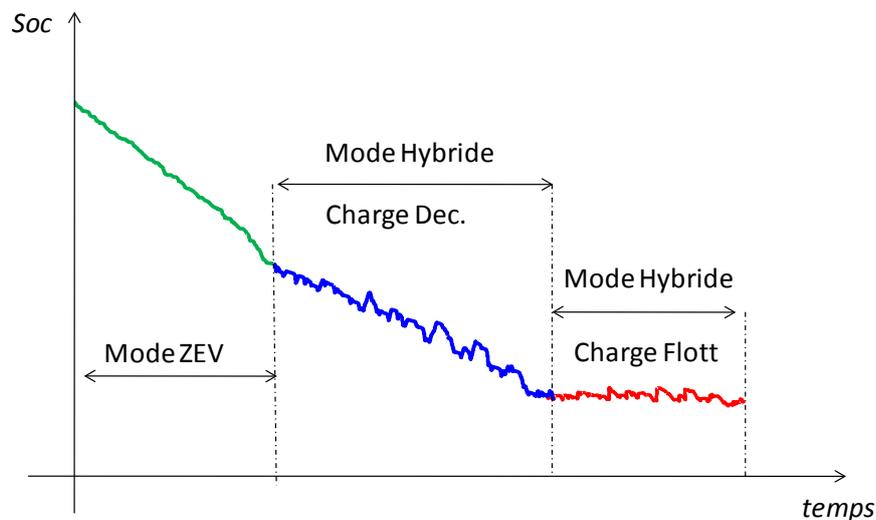


Figure 3-2 : Gestion possible de l'état de charge de la batterie dans un hybride rechargeable

La première zone correspond à un mode tout électrique (fonctionnement en ZEV). La décroissance de l'état de charge est la plus rapide dans cette zone. La deuxième zone correspond à un fonctionnement hybride en décroissance d'état de charge. Cette décroissance est maîtrisée par la mise en route alternée du moteur thermique. La dernière zone débute quand l'état de charge arrive à sa limite basse et correspond à une logique de maintien de charge permettant au véhicule hybride rechargeable de fonctionner en mode hybride avant la prochaine possibilité de recharge.

Dans tout ce qui suit nous supposons connue la stratégie de gestion de la batterie et donc l'état de charge désiré sur un horizon donné.

### 3.2.3 Les différentes méthodes de gestion de l'énergie

Pour réaliser le partage instantané de puissance entre les deux sources dans le véhicule hybride thermique électrique tout en contrôlant le *Soc*, plusieurs méthodes ont été développées au cours des deux dernières décennies. Dans la littérature on trouve plusieurs classifications de ces méthodes (Salmasi 2007), (Gurkaynak et al. 2009), (Crolla et al. 2008), (Lino Guzzella & Antonio Sciarretta 2008), (Michiel Koot et al. 2005). La mieux structurée à notre sens est celle proposée par Salmasi dans (Salmasi 2007) reprise aussi par (Çagatay Bayindir et al. 2011) et représentée sur la Figure 3-3 . Elle permet de scinder les méthodes de gestion de l'énergie en deux grandes familles : celles qui sont basées sur une logique modale en utilisant une connaissance experte du système, et celles qui utilisent les principes d'optimisation.

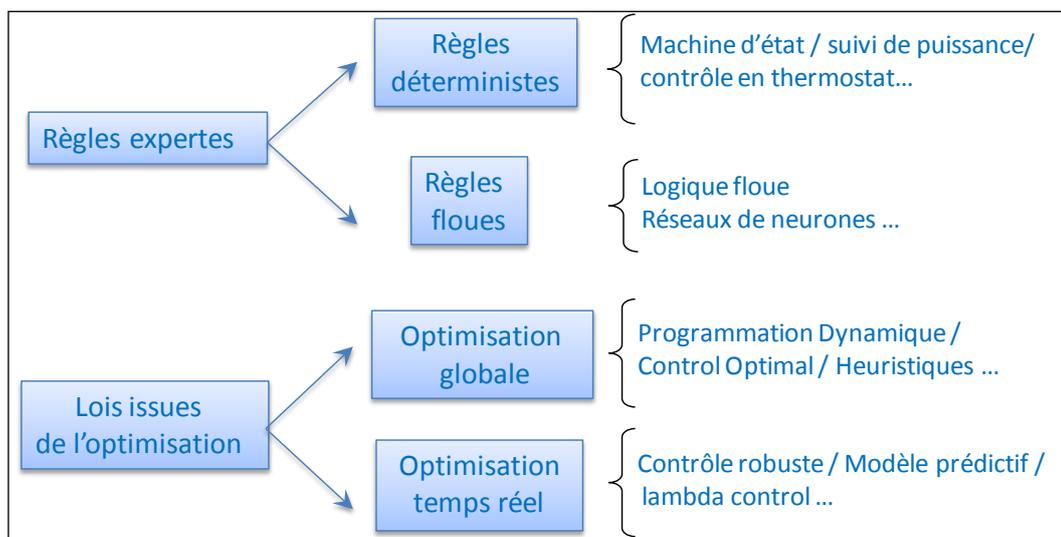


Figure 3-3 : Organigramme des différentes méthodes de gestion de l'énergie

#### 3.2.3.1 Les méthodes de règles expertes

Basées sur une approche par mode de fonctionnement, ces méthodes sont elles mêmes divisées en deux catégories : les règles déterministes et les règles Floues.

Dans les deux cas, ces règles doivent répondre aux objectifs de la gestion de l'énergie cités plus haut. Etant donné la nature modale et intuitive de ce type de méthode, aucune garantie ne peut être émise quant à leur optimalité vis-à-vis d'un critère. En revanche leur implémentation en temps réel est relativement aisée. Pour les deux catégories, déterministes et floues, quelques stratégies seront présentées à titre d'exemple.

##### 3.2.3.1.1 Les stratégies à base de règles déterministes

###### 3.2.3.1.1.1 Principe

Les règles déterministes, souvent ayant la logique « Si un seuil est atteint, alors on réalise une action », permettent d'une manière assez simple d'activer les différents modes de fonctionnement d'une façon experte et/ou intuitive. Pour mettre en œuvre ces règles on peut utiliser des combinaisons d'opérations logiques (Buntin & Howze 1995) ou des machines d'états (Weimin Li et al. 2007).

### **3.2.3.1.1.2 La stratégie thermostat**

Cette stratégie utilise un contrôle simple et efficace de l'état de charge de la batterie basé sur une hystérésis entre deux bornes de cette variable. Ainsi quand l'état de charge atteint un seuil haut on éteint le moteur thermique et quand il atteint un seuil bas le moteur thermique est démarré. La stratégie utilise également la notion d'efficacité énergétique du moteur thermique. En effet, en tenant compte des isovalues de consommation spécifique (CSP), cette stratégie vise généralement les points de fonctionnement de meilleurs rendements du moteur thermique. Ainsi quand le moteur thermique est allumé, son point de fonctionnement cible est fixé sur la courbe de puissance de meilleur rendement. Selon la puissance de traction appelée, la puissance optimale du moteur thermique peut être supérieure à cette demande et la différence sera prélevée pour recharger la batterie. Dans le cas inverse, la batterie fournit de l'énergie pour assister le moteur thermique. (Mehrddad Ehsani et al. 2005), (Sébastien Delprat 2002), (Mohammadian & Bathaee 2004).

Avantages - Un des principaux avantages de cette méthode est sa simplicité de mise en œuvre. Le contrôle par hystérésis de l'état de charge de la batterie assure la localisation de cet état dans une bande précise. Dans certaines configurations hybrides et certains dimensionnements, le fonctionnement du moteur thermique sur les meilleurs points de consommation spécifique est réellement avantageux comme dans le cas d'un hybride série avec un taux d'hybridation voisin de 0,5 (i.e la puissance de la batterie est du même ordre que la puissance du moteur thermique).

Inconvénients - Les inconvénients de cette méthode sont multiples.

- Le nombre d'arrêts/démarrages du moteur thermique est fixé par la largeur de la bande d'hystérésis du contrôle de l'état de charge et est complètement déconnecté de la demande de puissance.

- Selon l'architecture hybride et le dimensionnement des composants, notamment pour les taux d'hybridation faibles, il est impossible de faire fonctionner constamment le moteur thermique sur ses meilleurs points de fonctionnement. En effet, dans le cas d'un hybride parallèle par exemple fonctionnant à grande vitesse et à couple modéré (120 km/h sur plat par exemple), le moteur thermique est couplé aux roues et sa vitesse est dans ce cas également importante. Or la puissance correspondant aux meilleures CSP du moteur thermique, dans ce cas de fonctionnement à grande vitesse, est assez importante. La différence entre cette puissance et la puissance requise pour la traction peut dépasser la puissance de recharge maximale de la batterie, notamment pour les faibles taux d'hybridation.

- Dans le cas où l'architecture et le dimensionnement le permettent, le fonctionnement du moteur thermique sur ses meilleurs points de fonctionnement entraîne une utilisation intensive du mode recharge de la batterie. En plus d'une efficacité énergétique limitée de ce mode due à la cascade de rendement des sous-systèmes, la forte sollicitation de la batterie entraîne des risques de vieillissement prématuré.

### **3.2.3.1.1.3 La stratégie de suivi de puissance**

A l'inverse de la stratégie thermostat, la stratégie de suivi de puissance (load following) (Kimura et al. 1999), (Emmanuel Vinot et al. 2008) privilégie la demande de traction pour activer l'une ou l'autre des fonctions de l'hybridation. Son principe repose sur un ensemble de règles telles que les suivantes.

1) Le passage du mode électrique (moteur thermique éteint) au mode hybride (moteur thermique en marche) dépend du franchissement d'un seuil de vitesse du véhicule ou d'un seuil de puissance ou une combinaison des deux avec une hystérésis entre l'activation des deux modes pour éviter les oscillations.

2) Le mode assistance électrique (boost) est activé lorsque la puissance demandée pour la traction dépasse la puissance maximale disponible du moteur thermique.

3) Le mode recharge de la batterie par le moteur thermique est activé lorsque l'état de charge de la batterie atteint un seuil bas.

4) La récupération d'énergie au freinage via le moteur électrique est favorisée dès que la puissance du véhicule est négative (décélération ou freinage).

Généralement, à ces règles viennent s'ajouter des limitations et des protections. En effet, étant donné leur aspect intuitif et non systématique, certains fonctionnements peuvent engendrer une utilisation à la limite des capacités des sous-systèmes.

Avantages - Le principal avantage de cette méthode est son aspect universel puisqu'elle peut s'appliquer aux différentes architectures et différents dimensionnements. Il est également possible de moduler la demande de la batterie en utilisant plusieurs paramètres comme le seuil de déclenchement du mode hybride et le seuil de déclenchement de la recharge de la batterie par le moteur thermique.

Inconvénients - Parmi les inconvénients de cette méthode nous pouvons citer le contrôle de l'état de charge implicite et non explicite et la difficulté de réglage des différents seuils. Comme toutes les stratégies à base de règles, cette stratégie ne garantit pas une consommation ou une émission de polluants proche de l'optimale.

### **3.2.3.1.2 Les règles floues**

Etant donné le nombre de paramètres intervenant dans la gestion de l'énergie ainsi que les incertitudes et les non linéarités existantes, une approche par logique floue peut être efficace (J. S. Won & R. Langari 2002).

Généralement un contrôleur à base de logique floue possède quatre composantes (Poursamad & Montazeri 2008).

- la « fuzzification » : elle permet la transformation d'une variable d'entrée en une variable floue.

- La base de connaissance : elle contient les définitions des fonctions d'appartenance des variables. Ces fonctions peuvent être de différentes formes : triangle, cloche ...

- L'inférence logique floue : raisonnement du système flou en fonction des règles établies.

- La « défuzzification » : transformation du résultat de calcul flou en une sortie quantifiée pour la prise de décision.

Ces opérations permettent par la notion d'appartenance relative des variables d'entrée à une classe de sortie de remplacer une logique booléenne appliquée aux règles expertes par une logique plus souple et plus continue.

Une commande par logique floue s'appuyant sur le lissage de puissance (« load levelling ») et permettant en même temps de faire fonctionner le moteur thermique sur des points de bon rendement a été proposée par Baumann (Baumann et al. 2000) pour la gestion de l'énergie d'un véhicule hybride parallèle.

### 3.2.3.2 Les lois issues de l'optimisation

Les lois de gestion de l'énergie peuvent aussi utiliser les méthodes d'optimisation. Il s'agit ici d'utiliser le degré de liberté de l'hybridation pour optimiser un critère, souvent la minimisation de la consommation de carburant (équivalent dans une première approximation à une minimisation des émissions de CO<sub>2</sub>). Ce critère pourrait être plus complexe en intégrant les émissions de polluant et/ou l'intensité d'utilisation de la batterie (nous verrons plus en détail ce dernier point dans le chapitre 5). Les méthodes d'optimisation peuvent être classées en deux catégories selon qu'elles soient utilisées hors ligne avec connaissance a priori de la mission instantanée du véhicule (profil de vitesse en fonction du temps), ou en ligne sans connaissance préalable de cette mission.

#### 3.2.3.2.1 Optimisation globale hors ligne

Les méthodes d'optimisation globale hors ligne se basent sur une connaissance a priori du profil de vitesse. Elles sont de ce fait destinées uniquement à la simulation, mais sont les seules à garantir une optimalité globale de la commande aux erreurs de modélisation près. En revanche, leurs principes et/ou leurs résultats, comme on le verra sur des exemples d'application ci-après, peuvent être utilisés pour développer des méthodes en lignes.

##### 3.2.3.2.1.1 1ère étape : formalisation du problème d'optimisation.

L'établissement du problème d'optimisation s'appuie sur la démarche suivante :

- l'identification des variables d'état et des degrés de liberté,
- l'établissement d'un critère à optimiser,
- l'identification des contraintes à respecter.

Dans le cas du véhicule hybride thermique-électrique, si on se limite à la commande globale (supervision), il existe un degré de liberté dans le choix instantané de la puissance demandée à chaque source comme on l'a vu précédemment. Il est donc possible, à partir d'une demande de puissance à la roue et de la demande des auxiliaires, de répartir cette demande entre les deux sources en optimisant un critère. La commande générée va conditionner directement l'état de charge ou l'état d'énergie de la batterie qu'on prend l'une ou l'autre pour la suite comme la variable d'état du problème d'optimisation.

Hormis quelques applications visant à maximiser les performances dynamiques, le véhicule hybride est souvent développé pour réduire la consommation de carburant et les émissions de polluant comme présenté au chapitre 1. Le critère à minimiser, le plus approprié dans ce cas est le suivant (Rajagopalan et al. 2003), (Lee & Sul 1998) :

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} (\alpha_{carb} \dot{m}_{carb}(i) + \alpha_{NOx} \dot{m}_{NOx}(i) + \alpha_{HC} \dot{m}_{HC}(i) + \alpha_{CO} \dot{m}_{CO}(i)) T_e \quad (3-1)$$

Où  $N$  est le nombre d'échantillons sur un horizon d'utilisation du véhicule,  $\dot{m}$  le débit instantané de carburant ou l'émission instantanée du polluant considéré (en g/s) et  $\alpha$  le poids accordé à chacun des débits.

Dans toute la suite, jusqu'au chapitre 5, on considèrera un critère unique minimisant la consommation de carburant sur la totalité du cycle considéré.

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \dot{m}_{carb}(i) \cdot T_e \quad (3-2)$$

Les contraintes à respecter sont de deux niveaux. Le premier concerne le dernier objectif de la commande globale qui est le contrôle de l'état de charge de la batterie avec le choix préalable des deux options possible (« charge sustaining » ou « charge depleting »). En effet une solution évidente pour minimiser le critère  $J$  est de ne jamais utiliser le moteur thermique. Seulement cette solution nécessite une utilisation permanente de la batterie entraînant une décharge continue sans maîtrise du  $Soc$ . La première contrainte à respecter est de ce fait :

$$Soc(N-1) - Soc(0) = \Delta Soc \quad (3-3)$$

Où  $\Delta Soc$  représente la variation de l'état de charge sur l'horizon fixé et dont la valeur est en cohérence avec l'option de gestion de la batterie choisie (« charge sustaining » ou « charge depleting »).

Les autres contraintes sont de type égalité, propres à chaque architecture hybride, et de type inégalité représentant les limitations des différents sous-systèmes de la chaîne de traction. Les contraintes de type égalité représentent les relations mécaniques et électriques imposées par les différents agencements des composants. Pour les contraintes inégalités, nous pouvons citer comme exemple les contraintes rassemblées sur le Tableau 3-1.

**Tableau 3-1 : Contraintes à respecter pour l'utilisation des composants de la chaîne de traction**

Batterie	Moteur électrique	Moteur thermique
$I_{bat\_min} < I_{bat} < I_{bat\_max}$	$T_{EM\_min} < T_{EM} < T_{EM\_max}$	$T_{ICE\_min} < T_{ICE} < T_{ICE\_max}$
$U_{bat\_min} < U_{bat} < U_{bat\_max}$	$\omega_{EM\_min} < \omega_{EM} < \omega_{EM\_max}$	$\omega_{ICE\_min} < \omega_{ICE} < \omega_{ICE\_max}$
$TMP_{Batt\_min} < TMP_{Batt} < TMP_{batt\_max}$	$TMP_{EM} < TMP_{EM\_max}$	$TMP_{ICE} < TMP_{ICE\_max}$

### 3.2.3.2.1.2 2<sup>ème</sup> étape : Choix d'une méthode d'optimisation

Les méthodes permettant de résoudre le problème d'optimisation peuvent être classées en deux familles : les méthodes heuristiques et les méthodes exactes.

#### 3.2.3.2.1.2.1 Les heuristiques et les meta- heuristiques

Les méthodes heuristiques et les méta-heuristiques sont des méthodes d'optimisation destinées à explorer d'une manière aléatoire ou organisée un domaine de nature complexe pour la recherche d'extrémum. Elles sont souvent de nature itérative et stochastique, et peuvent s'appuyer sur des algorithmes inspirés des processus physiques ou naturels et de la biologie. Parmi ces méthodes appliquées à l'optimisation globale de la gestion de l'énergie dans le véhicule hybride nous pouvons citer les suivantes.

- La méthode du recuit simulé : inspirée d'un processus utilisé dans la métallurgie (processus de cycle de refroidissement / réchauffage), cette méthode a été utilisée pour la gestion de l'énergie d'un véhicule hybride parallèle (Sébastien Delprat 2002), (Paganelli et al. 2000). Les auteurs ont noté en revanche que le minimum trouvé était un minimum local, bien que proche du minimum global.

- Les algorithmes génétiques (ou évolutionnistes) : utilisent la notion de population et de son évolution génétique. Un processus de sélection (inspiré de la sélection naturelle) permet de converger vers la solution (l'espèce) optimale. Dans (Poursamad & Montazeri 2008) les auteurs utilisent les algorithmes génétiques pour le réglage de paramètres d'une commande de véhicule hybride à base de logique floue.

- D'autres méthodes inspirées de la biologie animale comme l'algorithme des colonies de fourmis ou les essaims particulaires peuvent également être appliquées. Scordia rapporte une tentative infructueuse d'application des colonies de fourmis à la gestion d'énergie d'un véhicule hybride parallèle à cause de temps de calcul prohibitif (Julien Scordia 2004).

Ces méthodes peuvent être utiles dans le cas de systèmes complexes (dits aussi difficiles) dont les paramètres et le comportement sont assez méconnus. En revanche elles présentent plusieurs inconvénients tels qu'une mobilisation importante des ressources de calcul et une nécessité de réglage parfois fastidieux et intuitif des paramètres. L'atteinte du minimum global dans ce type d'approche n'est également pas garantie.

#### **3.2.3.2.1.2.2 Les méthodes exactes**

Les méthodes exactes permettent de trouver des solutions explicites, analytiques ou numériques au problème d'optimisation. Pour cela une représentation mathématique ou numérique est nécessaire pour leurs utilisations. Parmi les méthodes les plus connues et les plus utilisées dans le domaine de la gestion de l'énergie des véhicules hybrides on trouve la programmation dynamique (Lin et al. 2003), (J. Scordia et al. 2005), (O. Sundstrom et al. 2008) et le calcul variationnel utilisant le principe d'optimalité de Pontriaguine (S. Delprat et al. 2004), (Lino Guzzella & Antonio Sciarretta 2008), (Michiel Koot et al. 2005), (Kessel 2006). Etant données qu'elles sont à la base de certains travaux présentés plus loin, nous donnerons plus de détails sur ces deux méthodes au moment de leurs utilisations. Elles s'appuient pour leurs mises au point sur les modèles présentés dans le chapitre 2.

#### **3.2.3.2.2 Optimisation en ligne**

##### **3.2.3.2.2.1 Minimisation de la consommation équivalente (ECMS)**

La méthode de la minimisation de la consommation équivalente a été utilisée depuis une dizaine d'année (Paganelli et al. 2000), (Sébastien Delprat 2002). Des publications plus récentes utilisent des variantes adaptatives de cette stratégie (Cristian Musardo et al. 2005), (Hofman et al. 2007).

La méthode de base est applicable à un véhicule hybride avec une gestion flottante de la charge de la batterie et considère à chaque instant une consommation de carburant équivalente composée de :

- la consommation de carburant réelle du point courant,
- la consommation additionnelle virtuelle ou future.

Cette dernière peut être positive ou négative et correspond à une quantité de carburant fictive nécessaire pour recharger ou décharger la batterie afin que globalement ce réservoir auxiliaire ait un état moyen constant.

Le principe de la méthode repose sur une minimisation instantanée de la consommation équivalente. Seulement, à cause d'une estimation moyenne du rendement des différents composants nécessaire à l'estimation de la consommation virtuelle, une dérive de l'état de charge de la batterie est possible (Sébastien Delprat 2002). Pour résoudre ce problème, Delprat propose d'introduire une fonction de sensibilité à l'image de celle proposée par Seiler et Schröder (Seiler & Schröder 1998) pour compenser la dérive de l'état de charge.

#### **3.2.3.2.2.2 Optimisation utilisant la logique Floue**

Le processus de génération des règles Floues peut être utilisé pour optimiser un critère.

Des travaux rapportés dans (Rajagopalan et al. 2003) et (Reza Langari & J.-S. Won 2005)-(J.-S. Won & Reza Langari 2005) utilisent une commande Floue adaptative. Le premier utilise un critère composé pour minimiser à la fois la consommation de carburant et les émissions de polluants, le deuxième introduit la notion d'identificateur de situation de conduite à partir d'un extracteur d'information afin d'optimiser la consommation de l'énergie selon la situation de conduite.

#### **3.2.3.2.2.3 Autres méthodes**

D'autres méthodes utilisent les résultats d'optimisation globale hors ligne pour les adapter à une utilisation en ligne. Le co-encadrement de thèse de J. Scordia (Julien Scordia 2004), en collaboration avec le GREEN de Nancy a permis de développer une méthode basée sur les réseaux de neurones. L'apprentissage de ces réseaux utilise le modèle du véhicule et la programmation dynamique pour reproduire les commandes optimales en ligne correspondant aux situations proches rencontrées pendant l'apprentissage. Hormis quelques cas comme celui rapporté dans (Prokhorov 2008) utilisant un simulateur industriel de la Prius ou dans (Moreno et al. 2006) pour un véhicule hybride avec supercondensateur, peu de travaux ont utilisé cette démarche. Les réseaux de neurones sont souvent plutôt utilisés dans l'identification du cycle d'usage nécessaire à certaines techniques de commande de type prédictives (Yusuf Gurkaynak et al. 2010), (Reza Langari & J.-S. Won 2005). La thèse de S. Kermani, co-encadrée en collaboration avec le LAMIH de Valenciennes, s'est focalisée sur le développement d'une méthode d'optimisation en ligne basée sur le principe du minimum de Pontriaguine en utilisant le calcul variationnel. Une tentative de Delprat (Sébastien Delprat 2002) pour synthétiser un correcteur simple pour une commande dite  $\lambda$ -contrôle basée sur le même principe (minimum de Pontriaguine) rapporte des résultats non satisfaisants (voir détail dans la suite). Béguery et Dubray (Béguery et al. 2001) ont proposé de résoudre le problème de la régulation de l'état de charge en réalisant le calcul optimal hors ligne pour un véhicule hybride série (bus) permettant d'estimer le paramètre clé de cette commande à savoir le multiplicateur de Lagrange  $\lambda$ . Seulement le calcul hors ligne étant réalisé sur un seul cycle du bus, les aléas du trafic ne pouvaient pas être pris en compte. La méthode proposée par Kermani permet d'estimer le paramètre  $\lambda$  pour un véhicule hybride parallèle avec une adaptation dans les deux cas de figure : avec ou sans connaissance du trajet. Les deux méthodes, celle à base de réseaux de neurones et le  $\lambda$ -contrôle, feront l'objet de présentations plus détaillées ci-après.

### **3.3 Contribution à l'amélioration des stratégies de gestion de l'énergie**

Les travaux de recherche et d'encadrement réalisés dans le domaine de la gestion de l'énergie des véhicules hybrides ont concerné dans un premier temps l'amélioration de méthodes à base de règles déterministes puis des méthodes d'optimisation globale et en ligne à travers le co-encadrement de deux thèses citées précédemment.

#### **3.3.1 Stratégie mixte suivi de puissance et thermostat**

Nous avons proposé dans (Rochdi Trigui et al. 2009) une stratégie s'appuyant sur des règles déterministes avec une logique de suivi de puissance couplée à un contrôle en thermostat de l'état de charge de la batterie (Figure 3-4).

##### **3.3.1.1 Principe**

Dans la stratégie « thermostat » présentée précédemment, l'hystérésis sur l'état de charge de la batterie commande la mise en marche ou l'arrêt du moteur thermique. Dans la stratégie proposée ici, l'hystérésis sur l'état de charge de la batterie ( $Soc$ ) conditionne l'apparition ou l'inhibition du mode recharge de la batterie mais n'impose pas le mode électrique ou hybride. Les règles utilisées pour ce fonctionnement sont les suivantes.

- Quand le seuil bas  $Soc_b$  est atteint le mode recharge de la batterie par le moteur thermique est activé et le mode assistance électrique « boost » est inhibé.

- Quand le  $Soc$  passe au dessus du seuil haut  $Soc_h$ , le mode recharge est inhibé et le mode « boost » est activé avec une limitation selon les capacités de la batterie.

Pour la gestion des modes électriques et hybride, nous utilisons des seuils de puissances paramétrés en fonction du  $Soc$  de la batterie. Si on appelle  $P_t^*$  la puissance de traction demandée (produit de la vitesse mesurée de la roue et du couple demandé par le conducteur) les règles utilisées s'énoncent comme suit.

- Si la puissance  $P_t^*$  est négative (décélération ou pente descendante) le mode électrique est privilégié. En effet, selon la capacité de la batterie à se recharger, la totalité ou une part de l'énergie est récupérée à travers le moteur électrique. Si la batterie est complètement chargée ( $Soc=Soc_{max}$ ), le frein moteur thermique ou/et les freins mécaniques sont actionnés, mais pas le frein électrique.

- Si la puissance  $P_t^*$  est positive (traction), un test de sa valeur par rapport à deux seuils de puissances  $P_h$  et  $P_b$ , représentant une bande d'hystérésis, permet d'actionner le mode électrique ou le mode hybride. Les deux seuils peuvent être constants ou fonction de l'état de charge de la batterie pour tenir compte de la disponibilité de la puissance selon le  $Soc$  par exemple (cf Figure 3-1). Dans une première approximation, cette variation est considérée linéaire comme c'est indiqué sur la Figure 3-5.

### 3.3.1.2 Options

Au lieu d'un fonctionnement binaire des modes recharge et « boost » actionnés par la commande par hystérésis sur le *Soc*, différentes options sont possibles pour fixer la valeur de la puissance demandée ou fournie par la batterie pendant ces modes.

Pendant le mode recharge, la puissance demandée pour recharger la batterie peut être constante (option R1 sur Figure 3-6) ou fonction du *Soc* (option R2). La puissance demandée au moteur thermique est la somme de la puissance demandée pour la traction  $P_t^*$ , de la puissance des auxiliaires et de la puissance demandée pour la recharge de la batterie ( $P_{rech}$ ).

Pendant le mode d'assistance électrique, la puissance fournie par la batterie ( $P_{boost}$ ) est fonction de la demande de traction et du seuil de puissance maximale du moteur thermique à partir duquel on demande de l'assistance électrique. Ce seuil correspond généralement<sup>12</sup> à la puissance maximale du moteur thermique.

Une variante de la stratégie proposée correspond à une autorisation permanente du mode boost dans la bande d'hystérésis du *Soc* mais avec une limitation  $P_{boost\_max}$  dont l'amplitude est proportionnelle à  $(Soc - Soc_b)$  (option B2, Figure 3-6).

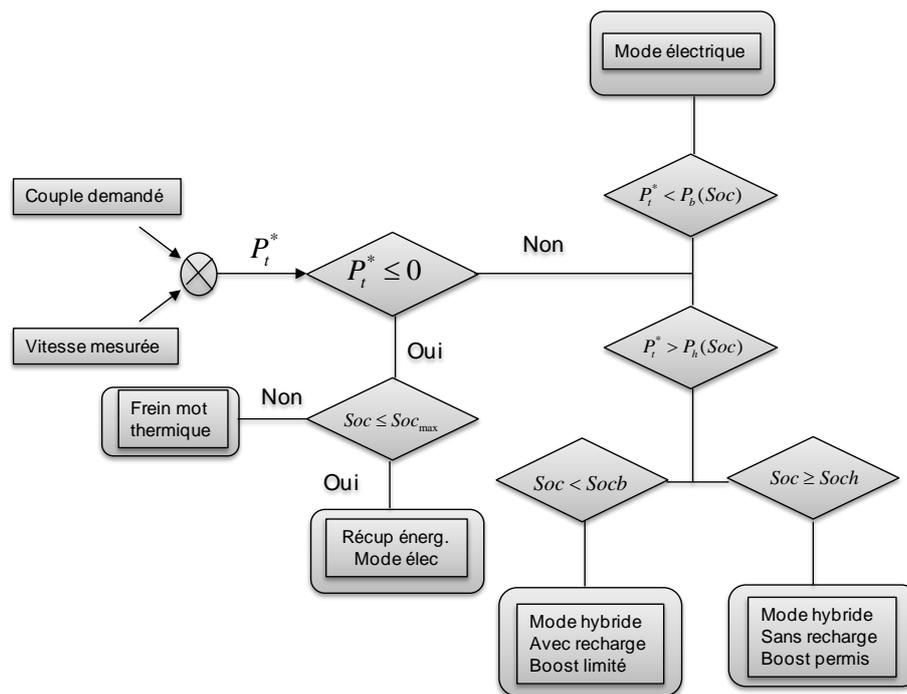


Figure 3-4 : Algorithme de gestion de l'énergie de la stratégie mixte.

<sup>12</sup> Dans certain cas où le dimensionnement des composants est favorable, il peut être intéressant de fixer le seuil de puissance à partir duquel on demande de l'assistance électrique à la puissance optimale correspondant aux meilleurs *CSP* du moteur thermique.

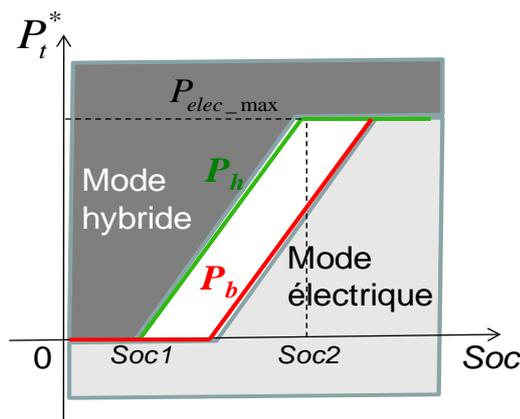


Figure 3-5 : Règles de choix du mode de fonctionnement

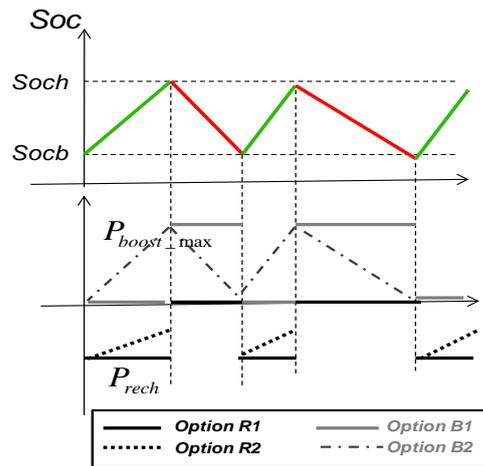


Figure 3-6 : Contrôle par hystérésis de l'état de charge de la batterie

Ce type de stratégie a été implémenté dans différents modèles de véhicules hybrides de VEHLIB (B. Jeanneret et al. 1999), (Emmanuel Vinot et al. 2008). Elle présente l'avantage d'une simplicité d'implémentation et d'une robustesse vis-à-vis des variations des paramètres et des erreurs de modélisation. Elle combine l'avantage de la méthode « thermostat » pour un contrôle performant de l'état de charge et celui de la méthode de suivi de puissance pour éviter des fonctionnements abusifs de la batterie. Cette méthode a été également testée sur une configuration hybride parallèle en expérimentation HIL sur le banc moteur. Les résultats de cette expérimentation seront exposés au § 3.4.1)

### 3.3.2 Utilisation des réseaux de neurones pour une commande sous optimale

#### 3.3.2.1 Principe

Les méthodes d'optimisation globale sont valables quand le profil de vitesse du véhicule est connu a priori. Elles sont de ce fait réduites à une utilisation en simulation qui peut servir pour l'évaluation des stratégies de commande en ligne. Elles peuvent également être utilisées dans les procédures de dimensionnement des composants comme il sera expliqué dans le chapitre 4. Une autre utilisation consiste à développer des méthodes de commande en ligne à partir de résultats hors ligne comme présenté ci après. La première étape est de réaliser des simulations hors ligne sur une base de données de profils de vitesse (ou cycle) pour véhicules particuliers disponible au LTE (André 1997). Ces simulations utilisent le modèle inverse du véhicule (présenté au chapitre 2) et la méthode d'optimisation de la gestion de l'énergie basée sur la programmation dynamique. La deuxième étape permet, à l'aide de la construction de réseaux de neurones, d'utiliser les résultats de simulation comme base d'apprentissage et d'utiliser ensuite ces réseaux dans la commande en ligne.

#### 3.3.2.2 La programmation dynamique

La programmation dynamique est définie comme une méthode de résolution numérique permettant d'explorer d'une manière échantillonnée et systématique l'espace des solutions admissibles et de sélectionner la solution globale répondant au critère d'optimisation choisi.

La théorie des graphes est souvent utilisée pour formaliser cette méthode. Une ou plusieurs variables d'état sont choisies puis leur espace temporel maillé avec un pas d'échantillonnage donné. Des algorithmes dédiés sont ensuite utilisés pour trouver le chemin du graphe qui assure l'optimum du critère.

Dans le cas du VHTE, la variable d'état choisie pour être représentée par le graphe est l'état de charge de la batterie. Le maillage de l'espace ( $Soc$ ,  $temps$ ) conduit à un graphe bi-dimensionnel représenté sur la Figure 3-7 (les points de  $Soc$  initial et final peuvent être différents). L'échantillonnage en fonction du temps est celui correspondant au profil de vitesse utilisé comme entrée pour la simulation du modèle inverse du véhicule. En théorie, l'espace maillé devrait correspondre à un rectangle évoluant entre le  $Soc_{min}$  et le  $Soc_{max}$ . Afin de réduire cet espace, et donc le temps de calcul et l'encombrement de la mémoire, on introduit les limites de charge et de décharge correspondant aux courants maximal et minimal de la batterie.

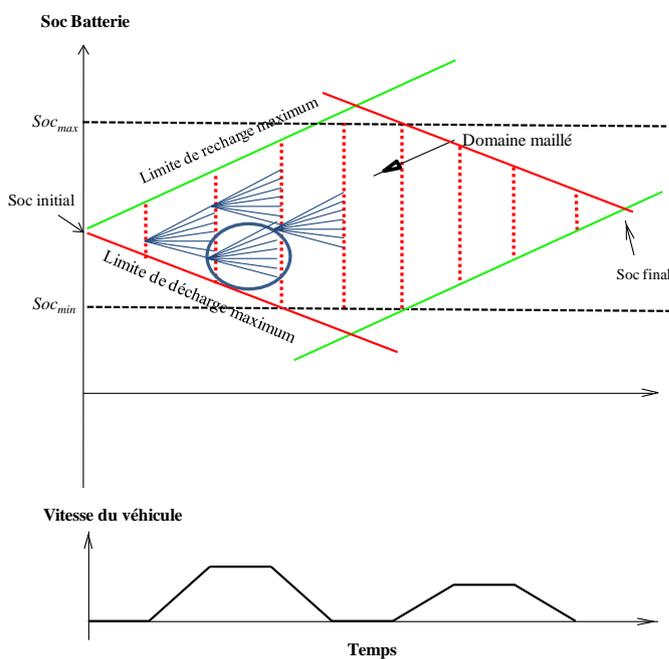


Figure 3-7 : Maillage du domaine de l'état de charge de la batterie pour la méthode de la programmation dynamique.

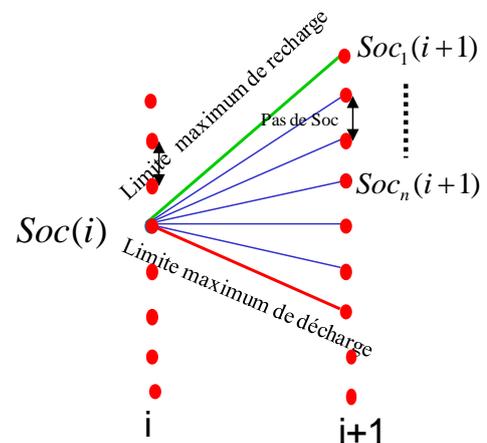


Figure 3-8 : Exemple d'éventail d'arcs entre deux instants du graph

A chaque instant  $i$  du cycle, et à partir d'un point du graphe représentant un état de charge  $Soc(i)$ , différentes possibilités de réaliser l'état de charge de l'instant suivant  $Soc_j(i+1)$  sont envisageables. Chaque point  $Soc(i)$  peut être de ce fait relié par un arc à un point suivant de l'espace conduisant à explorer un nombre exponentiel de possibilités. Comme le  $Soc$  est une fonction intégrale du courant, la pente d'un arc reliant deux points du graphe représente le courant de la batterie entre l'instant  $i$  et l'instant  $i+1$ . Ainsi comme le montre l'éventail d'arc représenté sur la Figure 3-8, à chaque passage de l'instant  $i$  à l'instant  $i+1$  on balaie d'une manière discrète les courants possibles de la batterie depuis le courant de décharge maximal jusqu'au courant de recharge maximal.

Comme expliqué précédemment, pour un arc donné du graphe, le courant et donc la puissance de la batterie sont fixés. En utilisant un modèle inverse du véhicule hybride, et à partir du couple et de la vitesse à la roue correspondant au cycle d'entrée, aux instants considérés ( $i$  et  $i+1$ ), les conditions au nœud de puissance sont calculées. A partir de cette

puissance au nœud (mécanique électrique ou mixte) la puissance du moteur thermique est déduite en utilisant la puissance de la batterie correspondant à l'arc étudié. Les contraintes de l'architecture permettent ensuite de fixer le couple et la vitesse du moteur thermique. Le modèle de celui-ci permet de calculer le débit instantané de carburant qui sera pris dans notre cas comme le coût associé à l'arc considéré. Remarquons au passage que ce coût peut correspondre à une fonction composée incluant les émissions de polluants par exemple.

Pour chercher dans le graphe ainsi construit avec ses coûts associés, le chemin de  $Soc$  conduisant au minimum de  $J$  (equ 3-2), le principe d'optimalité de Bellman peut être utilisé. L'algorithme de Ford utilisant ce principe permet l'identification du chemin optimum en partant de la fin du cycle et en remontant tout le graphe (J. Scordia et al. 2005), (R. Trigui et al. 2009).

Le principe de construction du graphe peut être appliqué à toutes les topologies hybrides thermiques-électriques.

### 3.3.2.3 Réseaux de neurones pour commande en ligne

La programmation dynamique ainsi construite nécessite la connaissance du profil de vitesse à l'avance. Afin de répliquer en ligne les résultats de l'optimisation à base de la programmation dynamique, une approche par réseaux de neurones a été mise en place (Julien Scordia et al. 2009). Ces réseaux de neurones de type RCE (« Restricted Coulomb Energy ») permettent de réaliser une classification bayésienne où chaque vecteur d'apprentissage définit une zone d'influence d'un certain rayon. Un degré d'appartenance à cette zone est défini à l'image du degré d'appartenance en logique floue.

Pour réaliser une commande en ligne dans un véhicule hybride parallèle, deux réseaux de neurones ont été construits (Figure 3-9). Les deux ont comme entrées la demande du couple à la roue (image de la pédale du conducteur), la vitesse mesurée à la roue, le  $Soc$  de la batterie, la valeur visée du  $Soc$  et la valeur de la puissance des accessoires électriques. Le premier a comme sortie la variable commandant l'état du moteur thermique  $\theta$ . Le deuxième permet de fournir à chaque instant la demande de puissance du moteur électrique  $P_{EM}$ .

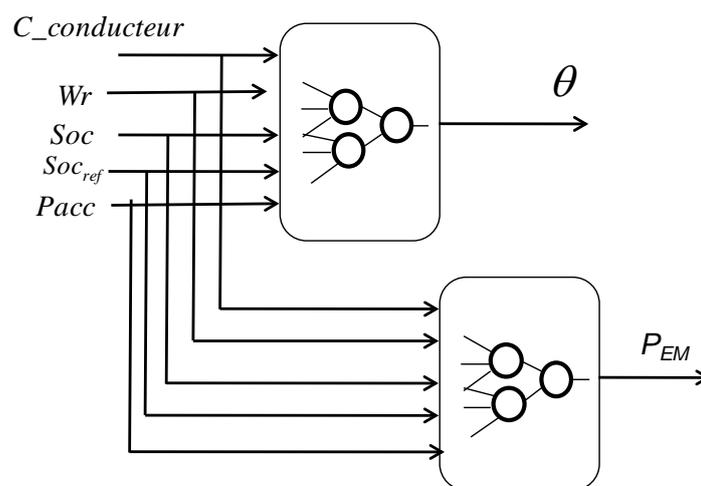


Figure 3-9 : Réseaux de neurones mis en œuvre

La phase d'apprentissage a été réalisée sur la base de cycle HYZEM disponible au LTE (André 1997). Les différents cycles ont été simulés utilisant le modèle inverse et la méthode de la programmation dynamique.

Utilisant le même modèle inverse du véhicule, cette méthode a été simulée puis comparée à la loi optimale utilisant la programmation dynamique avec connaissance du cycle a priori. Le cycle utilisé pour la simulation est un cycle urbain appartenant à une base de données différente de la base d'apprentissage (cycle ARTEMIS (André 1997)). Le but de cette simulation a été de quantifier la perte d'optimalité en passant d'une méthode optimale hors ligne à une méthode sous optimale pouvant être implémentée en ligne. Les résultats sont présentés sur la Figure 3-10.

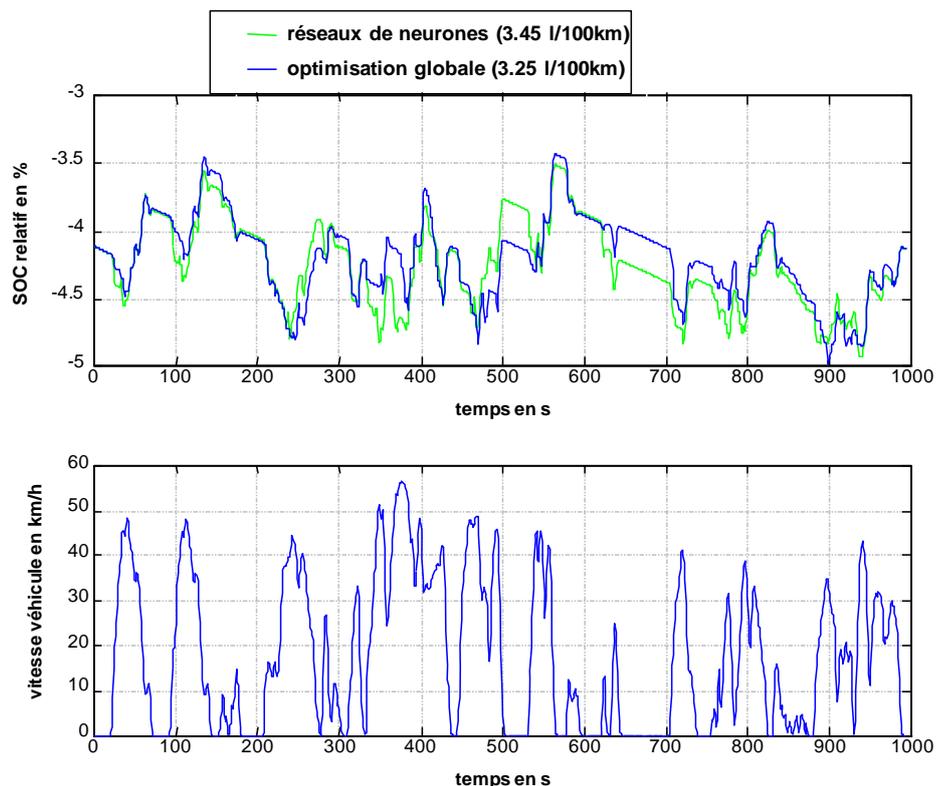


Figure 3-10 : Comparaison de la trajectoire de l'état de charge entre la méthode d'optimisation globale et la méthode des réseaux de neurones.

Malgré les similitudes dans les formes d'onde et dans les amplitudes pour le *Soc* de la batterie sur une grande partie du cycle, la consommation de carburant est passée de 3,25 l/100km pour la méthode optimale à 3,45 l/100 km pour les réseaux de neurones étudiés, soit une perte d'optimalité de 6 % environ.

Par rapport à d'autres méthodes d'optimisation en ligne, cette méthode permet de s'affranchir de réglage ou de reconnaissance de cycle de par les informations implicites contenues dans la base d'apprentissage. En revanche, on constate une dérive du *Soc*, comme par ailleurs dans les méthodes ECMS. Un correcteur supplémentaire simple de type PI a été rajouté. Cette méthode a été ensuite implémentée en temps réel sur un véhicule hybride parallèle émulé. Il a en revanche fallu utiliser une technique d'élagage des réseaux de neurones à cause de la capacité du système de commande temps réel. Cet élagage s'accompagne sans surprise de perte de performance de la méthode.

### 3.3.3 Le $\lambda$ -contrôle

Une autre possibilité d'utiliser l'optimisation globale hors ligne pour développer une stratégie sous optimale en ligne consiste à mettre en œuvre le principe du minimum de Pontriaguine en estimant en ligne la valeur du multiplicateur de Lagrange  $\lambda$ .

#### 3.3.3.1 Le principe du minimum de Pontriaguine

Le critère  $J$  (cf. equ. 3-2) peut être minimisé sous ses contraintes associées, sur le cycle connu à l'avance, en utilisant le principe du minimum de Pontriaguine (Culioli 1994), (Donald E. Kirk 2004). Ce principe est détaillé en annexe 7 et permet de réduire le problème d'optimisation globale à une minimisation instantanée d'une fonction  $H$  appelée Hamiltonien.

Si on applique cette méthode au problème d'optimisation globale de la gestion de l'énergie du véhicule hybride, on peut exprimer le problème comme suit.

La variable d'état considérée peut être l'état de charge  $Soc$  ou l'état d'énergie  $Soe$  exprimée par :

$$x(t) = Soc(t) = Soc(t_0) - \frac{100 \int_{t_0}^t I_{bat}(t) \eta_f dt}{3600 C_n} \quad (3-4)$$

Ou

$$x(t) = Soe(t) = Soe(t_0) - \int_{t_0}^t P_{bat\_0}(t) dt \quad (3-5)$$

Avec  $P_{bat\_0} = E_{bat} I_{bat} = P_{bat} + R_{bat} I_{bat}^2$  la puissance délivrée par la batterie augmentée de ses pertes ohmiques (utilisation du modèle électrique statique).

Notons que dans le cas d'une tension à vide ( $E_{bat}$  ou OCV selon les notations) constante et un rendement Faradique  $\eta_f$  égal à 1, les deux variables d'état  $Soc$  et  $Soe$  sont équivalentes.

Le vecteur de commande  $u$  conduisant à la répartition de puissance entre le moteur thermique et les batteries doit permettre de fixer les degrés de liberté. Selon l'architecture du véhicule hybride et le choix des variables de commandes, ce vecteur peut être différent. Par exemple pour un hybride parallèle  $u = (T_{ICE}, k)$  permet de commander le rapport de boîte fixant ainsi le degré de liberté interne à la transmission et le couple du moteur thermique qui détermine tout l'état du système pour une condition à la roue donnée  $(\Omega_w, T_w)$ . Pour un hybride série on peut choisir par exemple comme paramètre de commande  $u = (P_{GG}, \Omega_{ICE})$ . La puissance du groupe électrogène  $P_{GG}$  permet de fixer le degré de liberté externe pour la répartition de puissance entre la batterie et le moteur thermique et la vitesse du moteur thermique  $\Omega_{ICE}$  permet de fixer le degré de liberté interne pour le point de fonctionnement du moteur thermique.

Quelle que soit l'architecture hybride, le Hamiltonien à minimiser à chaque instant peut être :

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) = m_{carb} \dot{(u(t), t)} + \lambda(t) \cdot P_{bat\_0}(t) \quad (3-6)$$

si la variable d'état choisie est le *Soe*, ou

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) = m_{carb} \dot{(x(t), u(t), t)} + \lambda(t) \cdot \eta_F \frac{100}{3600 C_n} I_{batt}(t) \quad (3-7)$$

si la variable d'état choisie est le *Soc*.

Dans l'expression du Hamiltonien, le débit de carburant est indépendant de la variable d'état. Si on fait l'hypothèse, qu'à chaque instant, la puissance (ou le courant) des batteries est indépendante de l'état d'énergie (ou du *Soc*), la première condition d'optimalité (voir annexe 7) conduirait à  $\dot{\lambda}(t) = 0$  et donc à un multiplicateur de Lagrange constant pour tout l'horizon considéré. Cette hypothèse est plausible tant qu'on n'atteint pas la puissance batterie limite qui peut être assez sensible au *Soc* comme l'a montré la Figure 3-1. Ceci n'est en revanche pas le cas pour les supercondensateurs (Bernard 2007), (Emmanuel Vinot et al. 2010). Dans le cas d'un hybride utilisant des batteries, cette propriété permet de réduire le problème de commande optimale à la recherche d'un paramètre unique  $\lambda$  sur l'horizon considéré.

La deuxième condition d'optimalité ( $H(x(t), u^*(t), \lambda(t), t) \leq H(x(t), u(t), \lambda(t), t)$ ) permet la recherche du vecteur de commande optimale  $u^*$  qui minimise le Hamiltonien. Pour résoudre ce problème de minimisation deux méthodes sont possibles :

- numériquement à l'aide d'algorithme de recherche de minimum,
- en approximant les modèles des composants par des fonctions polynomiales par morceaux aboutissant à une forme de  $H$  dérivable par morceaux.

Prenons le cas d'un véhicule hybride parallèle. Soit  $(\Omega_w, T_w)$  le point de fonctionnement considéré à la roue. Si l'on fixe le degré de liberté interne (en supposant un rapport de boîte imposé par le conducteur par exemple), la composante du vecteur de commande  $u^*$  restant à déterminer est  $T_{ICE}$ . Si l'on trace la fonction  $H$  pour ce point de fonctionnement et pour un multiplicateur  $\lambda$  donné en fonction de  $T_{ICE}$ , on trouve des variations du type présentées sur la Figure 3-11.

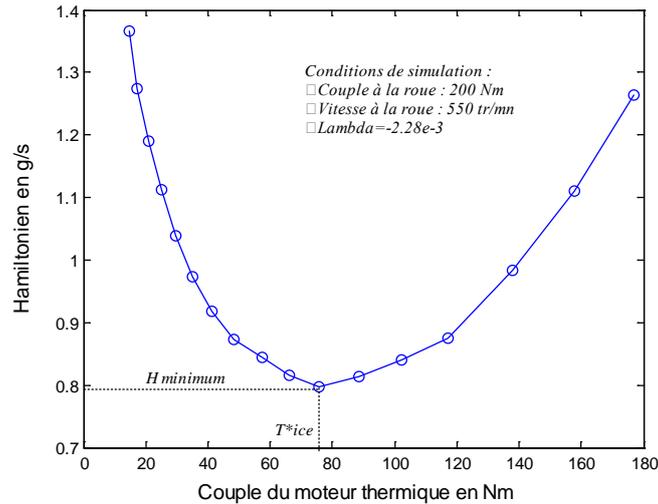


Figure 3-11 : Variation du Hamiltonien pour un point de fonctionnement et un multiplicateur  $\lambda$  donnés

Le point minimum de  $H$  correspond à la commande  $T_{ICE}^*$  recherché. Comme  $\lambda$  est constant sur tout le cycle considéré, pour une valeur donnée de  $\lambda$  il est possible de trouver le vecteur  $u^*$  sur tout le cycle. En effet les conditions à la roue ( $\Omega_w, T_w$ ) étant déduites du cycle par le modèle inverse du véhicule, il suffit de rechercher le minimum de  $H$  pour chaque point du cycle.

### 3.3.3.2 Le principe du $\lambda$ - contrôle

Comme vu plus haut, la connaissance de la valeur de  $\lambda$  suffit pour générer une commande optimale si l'on connaît les conditions à la roue sur tout le cycle. Seulement cette commande en boucle ouverte déboucherait sur un Soc (ou un Soe) non contrôlé si  $\lambda$  n'est pas calculé à l'avance avec connaissance entière du cycle.

Dans le cas réel, le cycle est inconnu. Pour cela, une possibilité de réaliser une commande sous optimale tout en contrôlant le Soc pourrait consister en une boucle fermée en insérant un correcteur entre l'erreur de Soc et la valeur de Lambda utilisée dans la commande optimale (Figure 3-12)

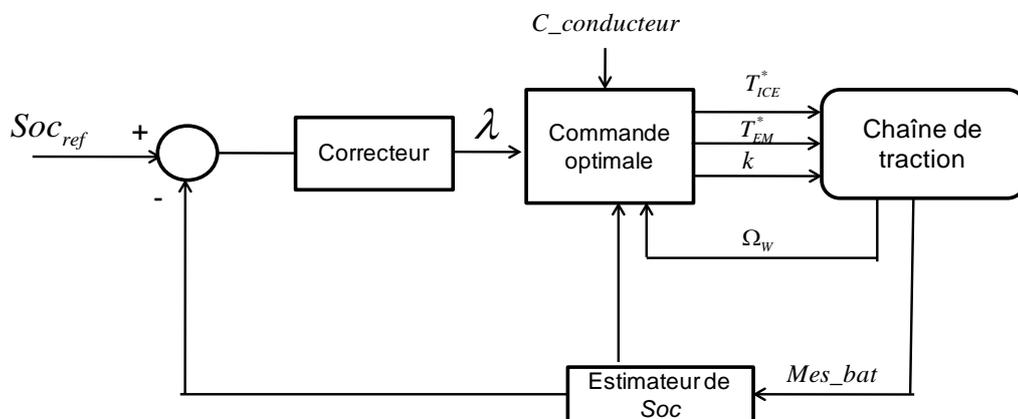


Figure 3-12 : schéma du Lambda contrôle

La commande optimale en ligne aura comme entrée, en plus de la valeur de  $\lambda$ , la commande du conducteur représentant la demande du couple à la roue, la mesure de la vitesse de la roue et une estimation du *Soc* dans le cas où le modèle de la batterie utilisé pour cette commande dépend du *Soc*.

Le type et l'horizon du correcteur sont importants dans cette commande. Delprat a signalé qu'un PID réactif aurait un effet d'éloignement de la trajectoire optimale de *Soc* avec une surconsommation non négligeable par rapport au minimum (Sébastien Delprat 2002). En effet le rafraichissement trop dynamique de la valeur de  $\lambda$  interfèrerait avec l'optimalité de la commande qui est sensée opérer avec une valeur constante de  $\lambda$  sur un cycle entier (plusieurs centaines de seconde). D'autres méthodes utilisant des horizons plus adéquats ont fait l'objet de travaux spécifiques et seront présentées plus en détail au § 3.4.2.

## ***3.4 Quelques cas d'application***

### ***3.4.1 Implantation de la Stratégie mixte « thermostat »-suivi de puissance sur un banc « PHIL »***

#### ***3.4.1.1 Rappel du principe de la stratégie***

La stratégie de gestion de l'énergie mixte « thermostat »-suivi de puissance étudiée ici est celle présentée au § 3.3.1. Par rapport à la stratégie « thermostat » simple elle permet de tenir compte de la dynamique du véhicule et solliciter la batterie en conséquence. Par rapport à une stratégie de suivi de puissance classique, elle permet de contrôler efficacement l'état de charge de la batterie et le contraindre dans une fenêtre bien définie sans pertes notables au niveau de la consommation de carburant.

#### ***3.4.1.2 Rappel du principe PHIL et des conditions d'essai***

Afin de tester la stratégie de gestion de l'énergie basée sur une méthode mixte « suivi de puissance/thermostat », nous avons utilisé la technique de l'émulation temps réel avec des composants de puissance dans la boucle (PHIL pour « Power Hardware In the Loop ») (A. Bouscayrol 2010). L'expérimentation est celle décrite dans le chapitre 2 § 2.4.2. Elle permet d'émuler le véhicule, sur un profil de vitesse donné, dans la même boucle de commande des composants en test. Les trois configurations (I, II et III) correspondant à un véhicule hybride parallèle à deux embrayages présentées sur le Tableau 2-5 (chapitre 2) ont été testées. Rappelons ici que les trois configurations partagent les mêmes données du véhicule et de la transmission mécanique et le même moteur thermique diesel testé sur le banc. La différence entre les trois configurations concerne les sous-systèmes de stockage d'une part (batterie Pb-Acide pour la configuration I, Batterie Ni-Mh pour la configuration II et des supercondensateurs pour la configuration III) et les ACMs d'autre part (alternateur amélioré pour la configuration I et machine synchrone à excitation mixte pour les configurations II et III).

La stratégie de gestion de l'énergie utilisée (stratégie mixte « thermostat »-suivi de puissance) est la même pour les trois configurations avec une adaptation pour le cas des supercondensateurs. Cette adaptation a concerné notamment les bornes de l'hystérésis du « thermostat » en introduisant des seuils de tension SC au lieu de seuils de *Soc*.

Les expérimentations ont consisté en la simulation en temps réel de différents cycles normalisés et d'usage enregistrés. La partie simulée, extraite de VEHLIB, permet de réaliser la régulation de vitesse du véhicule et de sortir à chaque instant, en utilisant le partage de puissance donné par la stratégie de gestion de l'énergie :

- la consigne d'injection pour le moteur thermique,
- la consigne de couple pour la machine électrique,
- la consigne de l'ouverture et la fermeture de l'embrayage,
- la consigne de vitesse de rotation de la machine de charge qui émule les forces du véhicule.

A chaque expérimentation d'un cycle donné, plusieurs essais sont réalisés. Ces essais correspondent à un état de charge initial différent de l'élément de stockage dans le but de tester la robustesse du contrôle d'état de charge d'une part, et d'avoir des consommations de carburant différentes d'autre part. Cette dernière condition permet de réaliser des interpolations linéaires sur les résultats finaux pour déterminer la consommation à bilan batterie nul ( $\Delta Soc=0$ ). C'est cette consommation qui est ensuite comparée aux autres configurations hybrides et au véhicule thermique de référence (en l'occurrence ici le véhicule ayant les mêmes composants de base sans hybridation).

### 3.4.1.3 Résultats expérimentaux

La Figure 3-13 et la Figure 3-14 représentent respectivement les comportements de l'état de charge durant un cycle NEDCC (cycle Européen avec départ à chaud) des batteries Plomb-Acide de la configuration I et des batteries NiMh de la configuration II. Les différents essais correspondent à un état de charge initial différent de la batterie.

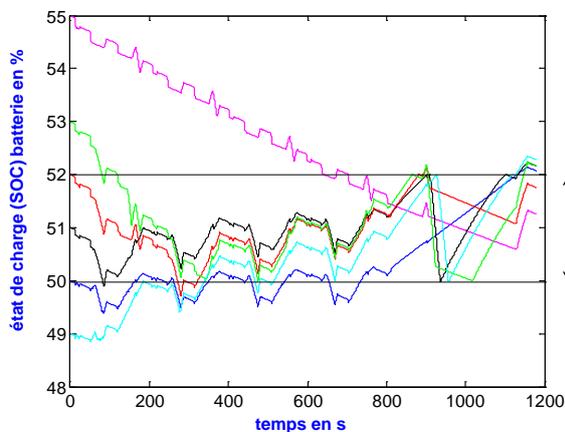


Figure 3-13 : Evolution de l'état de charge de la batterie de la configuration I pour différents états initiaux.

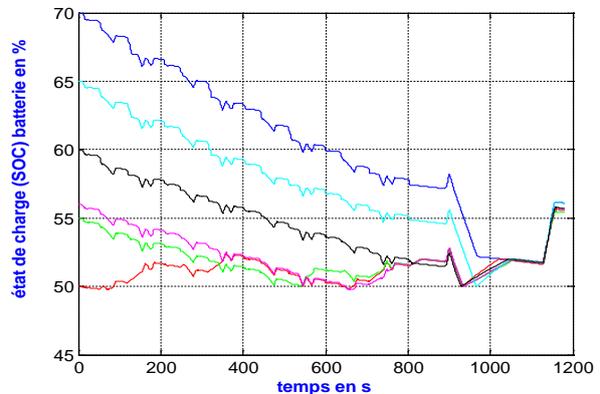


Figure 3-14 : Evolution de l'état de charge de la batterie de la configuration II pour différents états initiaux.

L'état de charge initial de la batterie est difficile à évaluer avec précision, notamment quand les essais se succèdent dans la même journée. Nous procédions seulement à la vérification de la tension à vide après repos (généralement au début de chaque journée d'essais). La charge initiale de la batterie que nous imposons est une entrée du programme qui conditionne l'état final à travers la logique de gestion de l'énergie, mais qui ne représente pas forcément l'état réel de la batterie. D'après la Figure 3-13 et la Figure 3-14, nous pouvons remarquer que, dans les deux cas, la batterie est ramenée dans la fenêtre d'utilisation préférentielle que nous avons fixée dans les lois de gestion et ceci quel que soit l'état de charge initial.

En ce qui concerne la configuration III, l'état de charge des supercondensateurs est donné directement par la tension à leurs bornes. La Figure 3-15 montre le comportement des supercondensateurs durant le même cycle (NEDCC) pour trois essais différents.

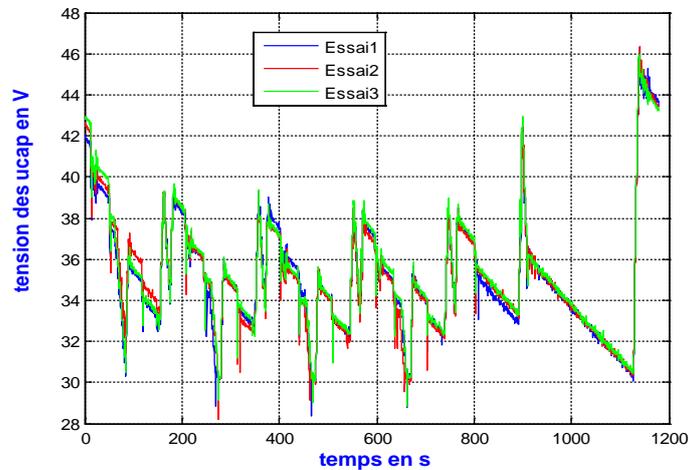
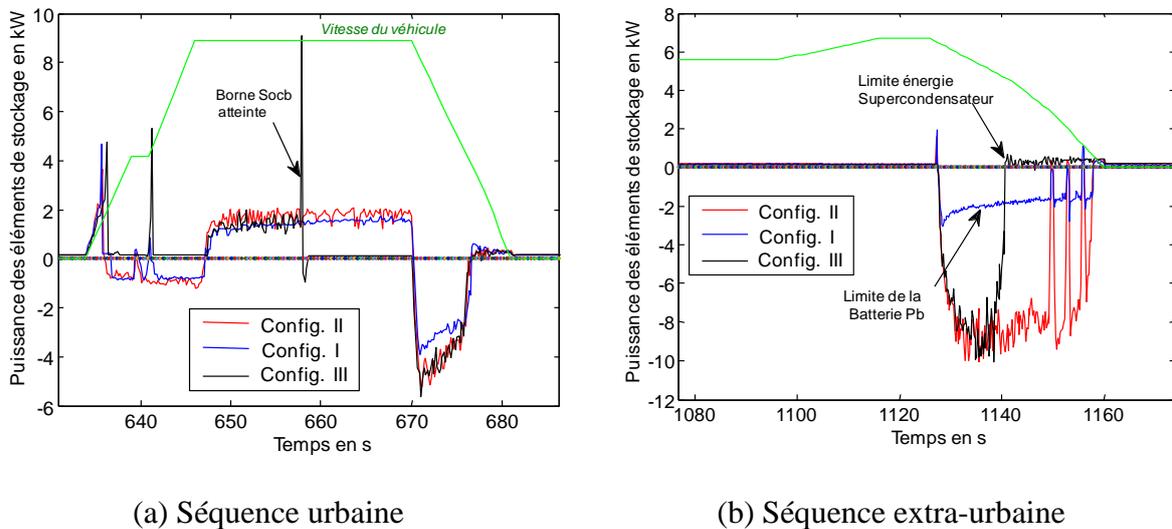


Figure 3-15 : variation de la tension des supercondensateurs pendant le cycle NEDCC pour la configuration III

Le comportement en puissance des trois systèmes de stockage est présenté sur la Figure 3-16 a) pour une phase urbaine du NEDCC et b).pour une phase extra urbaine.



(a) Séquence urbaine

(b) Séquence extra-urbaine

Figure 3-16 : Puissance instantanée des trois stockeurs durant une phase urbaine (a) et une phase extra-urbaine (b) du cycle NEDCC.

Pendant la phase urbaine, les deux batteries se comportent de la même manière avec un démarrage en tout électrique, une recharge de la batterie pendant l'accélération et un mode électrique durant tout le palier de vitesse. En revanche, la faible capacité énergétique des supercondensateurs impose un redémarrage au milieu du palier (action de la borne basse de l'hystérésis sur l'état de charge). Pour la récupération de l'énergie au freinage, seule la batterie au plomb (configuration I) présente des limitations dans cette phase du cycle. Pour la partie extra-urbaine, cette limitation est encore plus visible sur la dernière décélération où on peut remarquer également la saturation en énergie des supercondensateurs. Seule la batterie NiMh récupère toute l'énergie (aux pertes près) de cette décélération.

## 3.4.2 Stratégie $\lambda$ -contrôle pour la Gestion de l'énergie d'un véhicule hybride parallèle à 1 embrayage

### 3.4.2.1 Caractéristique du véhicule considéré

Le véhicule considéré dans ce cas d'application est de type hybride parallèle un embrayage avec le moteur électrique en entrée de la boîte de vitesse (Figure 3-17). Les caractéristiques du véhicule et des composants sont ceux de la configuration III du paragraphe 3.6.2.

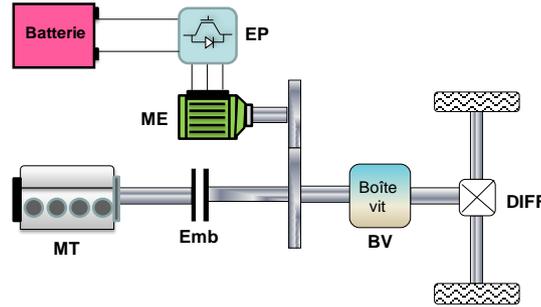


Figure 3-17 : Configuration hybride étudiée

Les contraintes égalités introduites par l'agencement du véhicule sont de type mécanique :

$$\Omega_w(i) = \frac{\Omega_{ICE}(i)}{R(k(i))} = \frac{\Omega_{EM}(i)}{R(k(i)) \cdot \rho} \quad (3-8)$$

$$T_w(i) = \eta_{gb}^\alpha \cdot R(k(i)) \cdot (T_{ICE}(i) + \rho \cdot \eta_\rho^\beta \cdot T_{EM}(i)) \quad (3-9)$$

Avec  $\alpha = \text{signe}(T_w)$  et  $\beta = \text{signe}(T_{EM})$ .

Et électriques en utilisant le modèle statique de batterie (modèle électrique simple mais avec dépendance à l'état de charge et à la température) :

$$P_{bat\_0} = E_{bat} I_{bat} = T_{EM} \Omega_{EM} + P_{pertes}(T_{EM}, \Omega_{EM}) + R_{bat} I_{bat}^2 \quad (3-10)$$

Avec  $P_{bat\_0}$  la puissance en sortie de la batterie augmentée des pertes ohmiques et  $P_{pertes}(T_{EM}, \Omega_{EM})$  les pertes du moteur électrique et de son convertisseur exprimées en fonction du point de fonctionnement en couple et vitesse.

Les contraintes inégalités sont les mêmes que celles présentées dans le Tableau 3-1.

Dans tout ce qui suit nous allons considérer l'état d'énergie  $Soe$  comme variable d'état bien que les résultats sont souvent présentés en fonction du  $Soc$ .

### 3.4.2.2 Adaptation du Lambda contrôle

Nous avons vu au § 3.3.3 que la méthode du minimum de Pontriaguine permet de trouver une solution optimale de la répartition de puissance instantanée en introduisant le multiplicateur de Lagrange  $\lambda$ . La valeur de ce multiplicateur conditionne l'état de charge (ou d'énergie) final de la batterie et est très dépendante du cycle d'usage (voir Figure 3-18). Hors

ligne, quand le profil de vitesse est connu à l'avance, ce multiplicateur peut être calculé pour un état de charge final donné.

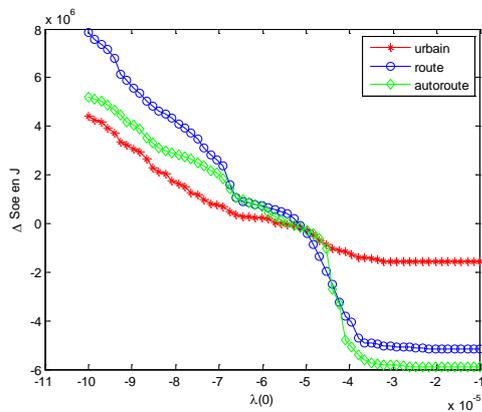


Figure 3-18 : Evolution de la variation d'état de charge sur un cycle en fonction du Paramètre  $\lambda$

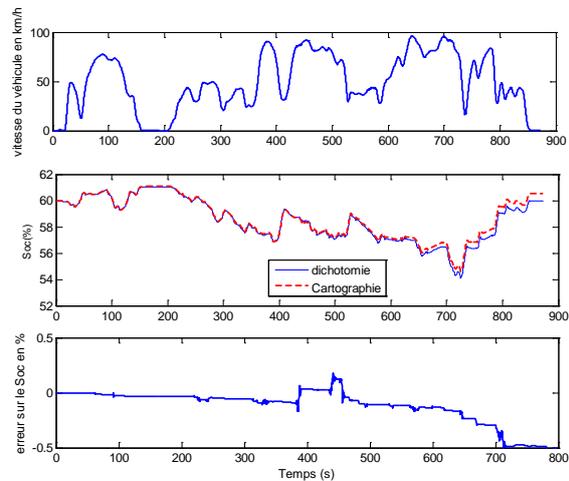
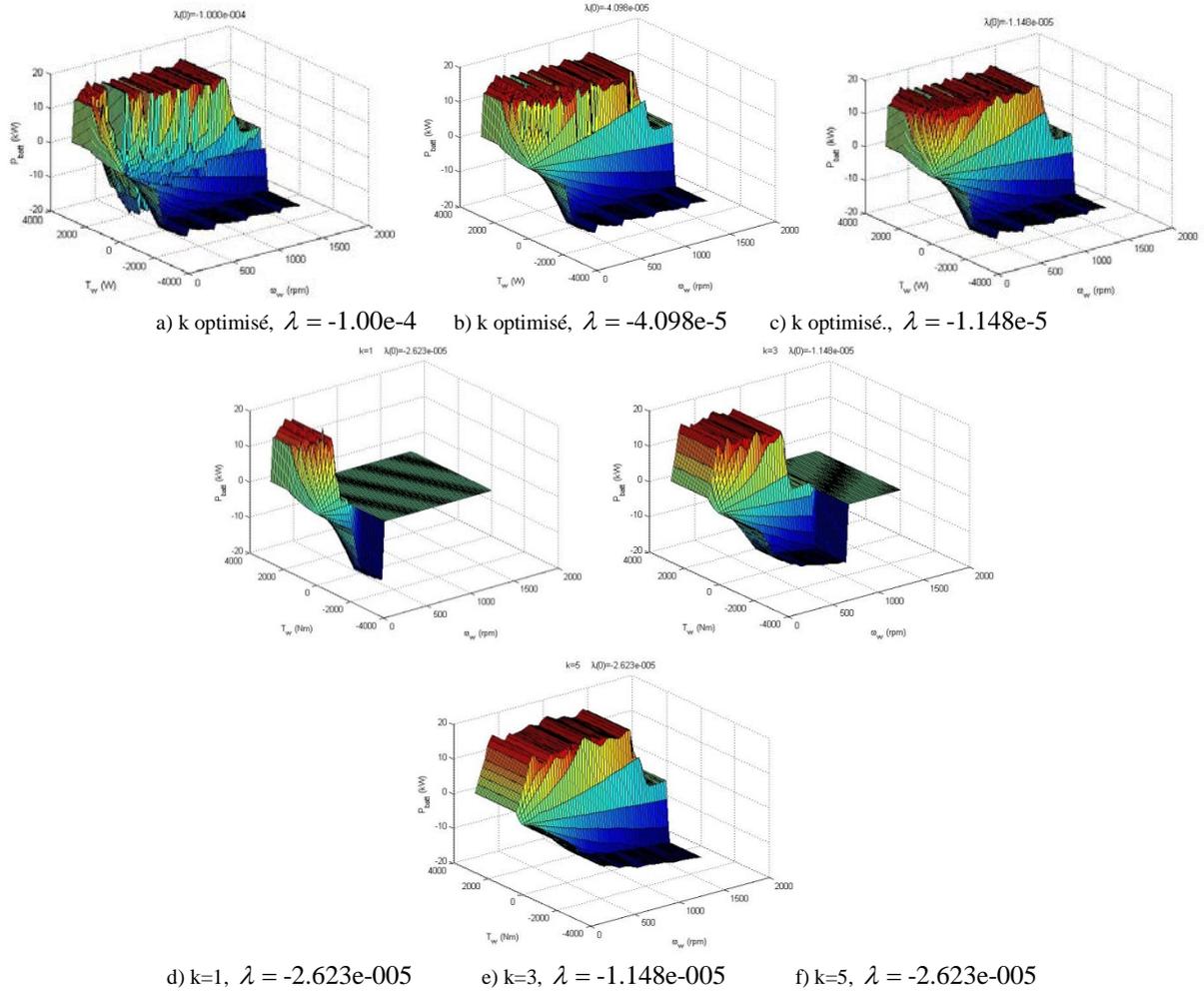


Figure 3-19 : Comparaison de la méthode par dichotomie et de l'estimation de  $\lambda$  par cartographie

Etant donné la monotonie des variations de l'état de charge (ou d'énergie) final en fonction de  $\lambda$  (Figure 3-18), une méthode numérique simple basée sur le principe de dichotomie peut être utilisée pour déterminer la valeur de  $\lambda$  amenant la batterie à une valeur de  $Soc$  donnée en fin de cycle ( $Soc_{final} = Soc_{initial}$  dans le cas de la Figure 3-19).

Dans le cas d'une application temps réel, il n'est souvent pas souhaitable de procéder à ce type de calcul en ligne pour des raisons de ressources disponibles. Une méthode de pré-calcul hors ligne de la valeur de  $\lambda$  a été présentée dans (Bernard 2007) pour la commande d'un véhicule hybride à Pile à Combustible et dans (Kermani et al. 2011) pour notre application considérée ici. Cette méthode est basée sur la génération a priori de cartographies de la puissance optimale de la batterie pour un point de fonctionnement donné du véhicule, en utilisant la recherche du minimum du Hamiltonien (cf § 3.3.3.1). Cette cartographie dépend de la valeur de  $\lambda$ , des deux grandeurs  $(T_w(i), \Omega_w(i))$  du point de fonctionnement considéré et du rapport de boîte s'il est imposé par le conducteur. La matrice de données obtenues à la suite de la discrétisation des vecteurs d'entrée est notée  $M(\lambda, \Omega_w, T_w, k)$ . Dans le cas de boîte de vitesse automatique, la recherche du rapport  $k$  est incluse dans la boucle d'optimisation et seuls les rapports optimaux vis à vis de la consommation de carburant sont considérés.

Un échantillon des cartographies générées hors ligne est donné sur la Figure 3-20.



**Figure 3-20 : Cartographie de la puissance optimale de la batterie en fonction des conditions à la roue et du paramètre  $\lambda$  .**

En utilisant les matrices ainsi calculées et stockées, il est ensuite aisé de calculer en temps réel pour une valeur donnée de  $\lambda$  et des conditions à la roue  $(T_w(i), \Omega_w(i))$  données, la valeur de la puissance batterie optimale pour le point  $i$  du cycle en utilisant une interpolation linéaire :

$$P_{bat\_0}(\lambda, \Omega_w(i), T_w(i)) = \text{interp\_lin}(M, \lambda, \Omega_w(i), T_w(i)) \quad (3-11)$$

Ainsi, si on considère tout le cycle, la variation de l'état d'énergie total sur le cycle peut être calculée comme suit :

$$\Delta Soe = \Delta x(\lambda) = - \sum_{i=0}^{N-1} P_{bat\_0}(\lambda, \Omega_w(j), T_w(j)) \Delta \quad (3-12)$$

La valeur de  $\hat{\lambda}$  correspondant à une variation d'état d'énergie désirée  $\Delta Soe = \Delta Soe_{ref}$  peut être estimée en résolvant l'équation (3-12). La trajectoire du  $Soe$  optimal (désiré) est à chaque instant  $i$  :

$$Soe_{ref}(i) = Soe_{ref}(0) - \sum_{j=0}^{i-1} P_{bat\_0}(\hat{\lambda}, \Omega_w(j), T_w(j)) \Delta \quad (3-13)$$

Le schéma de principe du contrôle en ligne est donné sur la Figure 3-21. Après la première étape réalisée hors ligne, une valeur de  $\hat{\lambda}$  est estimée à partir d'un cycle de référence afin d'atteindre un état d'énergie désiré en fin de ce cycle. La valeur de  $\hat{\lambda}$  est utilisée ensuite pour la commande optimale en temps réel.

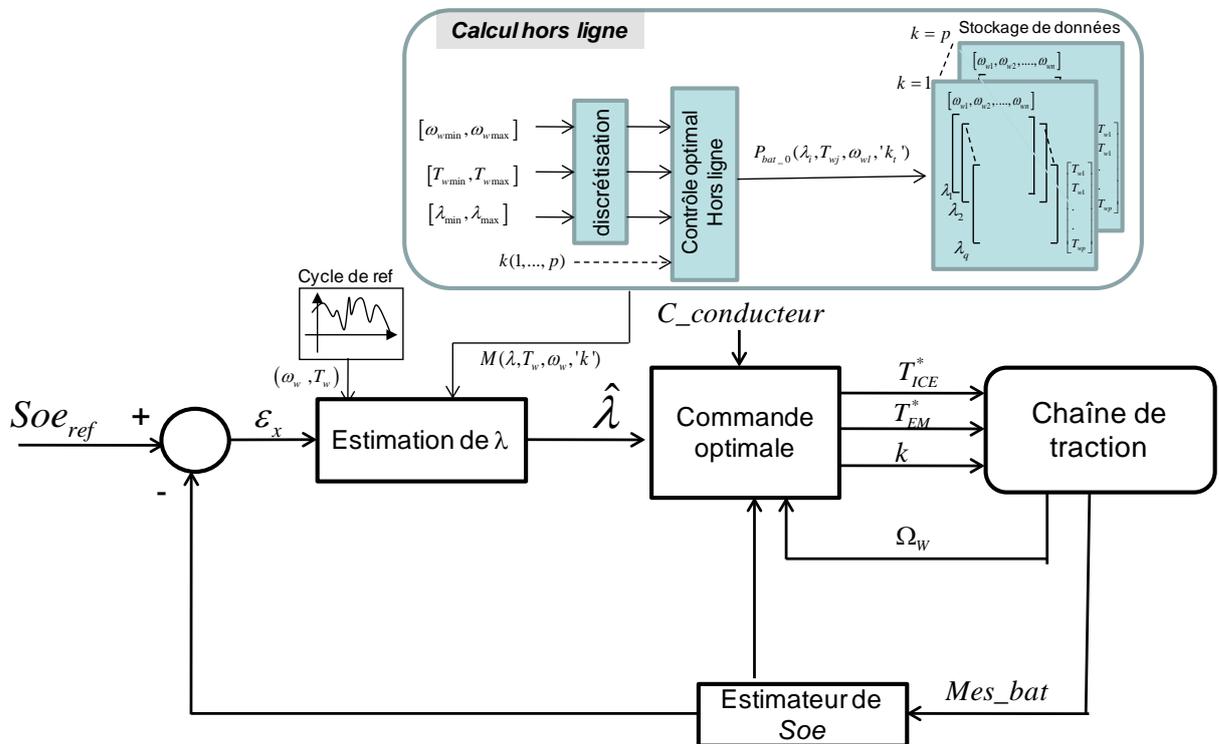


Figure 3-21 : Schéma de la commande mise en œuvre

Le processus d'estimation de  $\hat{\lambda}$  à partir du cycle de référence peut être déclenché périodiquement ou suite à un événement donné (voir § suivant).

Dans ce qui suit nous allons considérer deux cas pour l'utilisation du cycle de référence.

### 3.4.2.3 Cas d'un trajet prédéfini

Le cas particulier où l'on connaît a priori le trajet à réaliser, sans connaître le profil de vitesse, peut être intéressant. En effet, c'est le cas de plusieurs types de véhicules ayant une mission journalière fixe comme les bus, les bennes à ordures ménagères, les véhicules de nettoyage etc. C'est également le cas de véhicules particuliers équipés de GPS. L'idée ici est de constituer une base de données de cycles dans la mémoire du calculateur du véhicule associant un trajet à un enregistrement de profil de vitesse sur ce trajet. Cet enregistrement peut être unique, un tirage au hasard de plusieurs profils correspondant au même trajet ou un trajet moyen selon certains critères (vitesses, accélération, nombre d'arrêt ...).

L'enregistrement en question est pris comme cycle de référence et une valeur  $\hat{\lambda}$  est calculée pour atteindre l'état d'énergie cible de la batterie. Le véhicule évoluant sur le trajet considéré avec la commande correspondante présente un profil réel qui peut différer de la référence à cause principalement des différences des conditions de trafic. Le *Soe* commence alors à diverger du *Soe* optimal du cycle de référence (voir Figure 3-22).

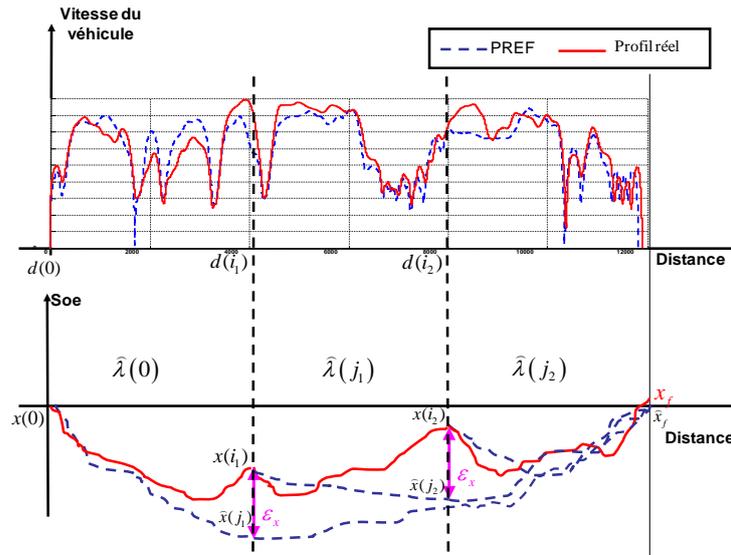


Figure 3-22 : Processus de réactualisation de  $\hat{\lambda}$  au cours d'un trajet

Quand l'écart entre les deux trajectoires de Soe atteint une limite  $|x(i_n) - \hat{x}(j_n)| > \varepsilon_x$ , alors une réactualisation de  $\hat{\lambda}(j_1)$  est réalisée en recalculant une nouvelle trajectoire ayant le Soe réel de cet instant comme point initial et le Soe visé (égal à l'état de départ dans le cas de la Figure 3-22) comme état final en utilisant la partie restante en distance du cycle de référence.

Cette opération est répétée autant de fois que nécessaire sur le cycle. Dans le cas de la Figure 3-22 deux réactualisations ont été nécessaires. Globalement, cette méthode présente de bonnes performances sur le plan optimalité de la consommation comme sur le plan du contrôle de l'état de charge. Par rapport à la méthode des réseaux de neurones testée antérieurement, elle amène des gains sur les deux aspects. En revanche, cette méthode suppose la connaissance du trajet et d'un cycle pré-enregistré sur ce même trajet.

#### 3.4.2.4 Cas d'un trajet quelconque

Le cas le plus général correspond à un profil de vitesse inconnu et un trajet inconnu. Dans ce cas des méthodes stochastiques utilisant les chaînes de Markov par exemple peuvent être utilisées pour essayer d'identifier les séquences de roulage (Johannesson et al. 2005).

Une méthode simple à implémentée consiste en une approche pseudo-prédictive avec une fenêtre temporelle glissante d'une périodicité fixe. Suite à un enregistrement passé sur cette fenêtre, le cycle de référence de la fenêtre suivante est considéré identique à la fenêtre passée. Cette approche suppose que les conditions d'utilisation du véhicule ne varient pas significativement entre deux fenêtres de temps.

Des simulations du véhicule considéré sur un parcours long (aller-retour) incluant plusieurs types de roulages (urbain, périurbain et autoroutier) sont réalisées en utilisant l'algorithme de commande temps réel de la Figure 3-21 avec une fenêtre glissante de 100 s pour le cycle de référence. La Figure 3-23 présente les résultats de simulation avec l'état de charge optimal et l'état de charge réel sur le cycle. La réactualisation de  $\hat{\lambda}$  est donnée sur le troisième graphe de la même figure.

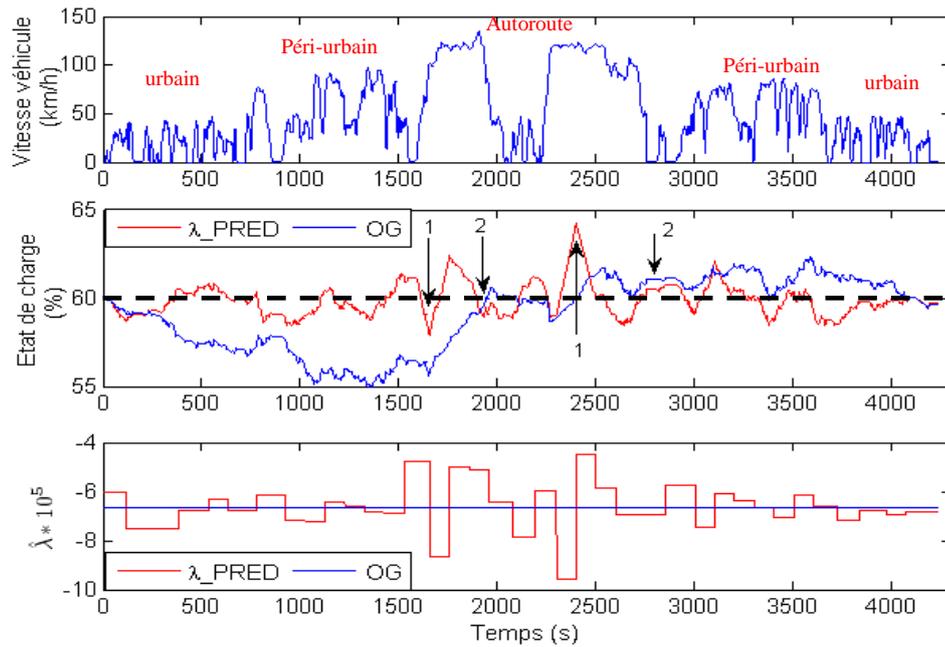


Figure 3-23 : Etat de charge optimal et état de charge suivi avec réactualisation périodique de  $\hat{\lambda}$  sur un cycle composé

Nous pouvons remarquer que, globalement sur tout le trajet, l'état de charge de la batterie reste proche de l'état de charge désiré à savoir Soc= 60 %. Cette stratégie (dite  $\lambda\_PRED$  sur le graphique) permet donc, dans ce cas d'utilisation, de réaliser le maintien de charge de la batterie sur le long terme. En revanche, et notamment pendant les phases de transition entre les conditions de roulage périurbaines et autoroutières (marquées par des flèches numérotées 1 sur la Figure 3-23), on constate un écartement important du Soc par rapport à la trajectoire optimale sur le cycle. Ces écarts entraînent des sauts importants dans la réactualisation de Lambda comme on peut le noter sur le troisième graphe de la Figure 3-23. Néanmoins après trois réactualisations de  $\lambda$ , l'état de charge revient à une valeur proche de l'optimale, indiquée par les flèches numérotées 2.

Du point de vue de la consommation de carburant, les résultats de simulation et d'essai en configuration véhicule émulé sont très proches de la consommation optimale obtenue dans le cas d'une boucle ouverte (OG sur les graphes de la Figure 3-23) (Kermani et al. 2011). Cette méthode a le grand avantage d'être générale sans nécessiter de connaissances préalables sur le trajet tout en approchant à moins de 2% près la consommation optimale. Les écarts entre le Soc de référence et le Soc visé pourraient être réduits en utilisant une méthode mixte réalisant les réactualisations de  $\lambda$  soit périodiquement soit suite à un seuil d'écart.

### 3.5 Conclusion

La gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides représente un élément clé dans la réussite de l'objectif pour lequel ce type de véhicules a été mis en œuvre. En effet, la répartition de la puissance instantanée entre les sources conditionne directement la consommation de l'énergie et l'utilisation efficace des éléments de stockage. Depuis plus de deux décennies cette thématique a mobilisé un nombre important de chercheurs. Des méthodes diverses ont été mises en œuvre. Certaines s'appuient sur les fonctions possibles de l'hybridation avec un réglage intuitif des paramètres. D'autres utilisent des principes d'optimisation et s'efforcent de se rapprocher de l'optimum possible sachant que l'application

en ligne de ces méthodes est forcément sous optimale de par la non connaissance a priori du cycle de conduite.

Parmi les méthodes que nous avons testées, la méthode de règles déterministes s'appuyant sur un suivi de puissance couplé à une hystérésis sur l'état de charge de la batterie (« thermostat ») a montré une efficacité et une robustesse satisfaisantes. Elle permet de remédier à des lacunes de la stratégie « thermostat » de base comme l'usage intempestif de la batterie. Elle est également facilement adaptable à différentes architectures hybrides. Son implantation sur un banc d'essai de type « PHIL » à l'échelle 1 a démontré sa robustesse et son adaptabilité à 3 configurations de composants. En revanche, elle nécessite quelques réglages intuitifs ou par des études paramétriques en utilisant les modèles. Elle ne garantit pas non plus un résultat proche de l'optimum. La recherche d'une consommation proche de l'optimum nous a conduits à explorer les méthodes d'optimisation hors ligne pour développer des stratégies pour la simulation dans un premier temps. De ces méthodes ont été ensuite dérivées des commandes en ligne. Entre les méthodes des réseaux de neurones associés à la programmation dynamique et la méthode du  $\lambda$ - contrôle qui utilise le principe du minimum de Pontriaguine, c'est la méthode du  $\lambda$ - contrôle qui a montré plus de proximité de l'optimum. Elle est également plus efficace dans le contrôle de l'état de charge de l'élément de stockage.

La gestion de l'énergie est mise en œuvre pour une architecture hybride donnée et un dimensionnement des composants (taux d'hybridation) donné. En revanche, selon la nature de cette gestion, elle peut solliciter différemment les composants et de ce fait a une influence directe sur leur dimensionnement. Nous verrons dans le chapitre 4 comment intégrer cette gestion dans le processus d'analyse et d'aide au dimensionnement des composants et dans le chapitre 5 comment étendre les critères d'optimisation pour tenir compte de la sollicitation des éléments de stockage.



## **4 Chapitre 4 : Aide au dimensionnement des véhicules hybrides**

### **4.1 Introduction**

Le dimensionnement des véhicules doit répondre à un cahier des charges dans différents domaines : sécurité, performance dynamique, émission de polluants, confort, émission de bruit, coût, consommation énergétique, etc. Certains de ces cahiers des charges obéissent à des normes comme la sécurité et les émissions de polluants, d'autres représentent des prestations demandées par l'utilisateur final ou encouragées par des mesures incitatives.

Le dimensionnement des sources d'énergie et de la chaîne de traction doit satisfaire le cahier des charges des performances dynamiques et des émissions de polluants tout en fournissant l'alimentation des auxiliaires de sécurité et de confort. Les véhicules hybrides présentent des degrés de complexités selon leurs architectures et nécessitent une gestion de l'énergie appropriée comme nous l'avons vu au chapitre précédent. Le dimensionnement des sources d'énergie et des composants de la transmission pour ce type de véhicule représente une tâche difficile étant donné les différentes combinaisons possibles pouvant répondre à un même cahier des charges. Nous nous proposons dans ce chapitre de donner des éléments d'aide pour un dimensionnement énergétiquement optimal de véhicules hybrides à partir d'un cahier des charges de performance dynamique donné. Peu de travaux ont été réalisés dans ce sens, nous pouvons en citer quelques uns (Geller et al. 2010), (Dominik Buecherl et al. 2009), (Knoke & Böcker 2007), qui seront rappelés et discutés dans les paragraphes concernés de ce chapitre. La plupart des travaux concernant le dimensionnement (le terme Anglais « design » est plus approprié ici) traite plutôt de composants comme les moteurs électriques (Faiz & Moayed-Zadeh 2005), (Aubertin et al. 2008), (Wu et al. 2009) ou les transmissions mécaniques (Kim et al. 2006), souvent sortis du contexte global en leur appliquant un cahier des charges spécifique, sinon générique. D'autres partent de cahiers des charges spécifiques au niveau du système véhicule mais considère l'amélioration d'une loi de gestion préalablement fixée pour optimiser différentes dimensions (taille géométrique, sollicitation des batteries) (Jaafar et al. 2009).

Après la mise en évidence du couplage fort entre la loi de gestion de l'énergie et le dimensionnement, différentes hypothèses de dimensionnement sont explorées dans ce chapitre. Une méthodologie d'aide au dimensionnement optimal vis-à-vis de l'énergie est ensuite proposée permettant de s'affranchir du poids de la stratégie considérée. Les outils de modélisation présentés au chapitre 2 sont mis à contribution pour réaliser des études paramétriques avec des analyses de différents aspects en relation avec les caractéristiques des composants utilisés.

### **4.2 Le cahier des charges et méthodologie**

#### **4.2.1 Cahier des charges**

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, nous nous limitons ici au cahier des charges dynamique et énergétique, le cahier des charges sur les émissions de polluants étant considérées comme acquies (nous y reviendrons au dernier chapitre).

#### **4.2.1.1 Le cahier des charges des performances dynamiques**

Le cahier des charges dynamique diffère d'une catégorie de véhicule à une autre. Généralement il contient des contraintes énoncées ci-dessous.

1- Vitesse maximale en régime permanent atteignable sur plat : bien que cette vitesse est limitée par le code de la route dans la plupart des pays, elle reste un critère reflétant la puissance de la motorisation. Pour un véhicule de transport en commun, elle peut conditionner la vitesse moyenne (vitesse commerciale) et donc l'efficacité de l'exploitation du moyen de transport.

2- Vitesse maximale en régime permanent atteignable sur une pente donnée : cette valeur de vitesse revêt une importance particulière pour un véhicule lourdement chargé évoluant sur des autoroutes avec des pentes importantes sur de longues distances. Nous verrons plus tard que c'est un paramètre particulièrement dimensionnant pour le véhicule hybride.

3- Durée de l'accélération maximale sur plat depuis l'arrêt jusqu'à une vitesse donnée : généralement synonyme de la puissance de la motorisation, elle représente souvent le paramètre dynamique le plus connu par les utilisateurs (souvent donnée sur les fiches des caractéristiques des véhicules particuliers).

4- Durée et/ou distance de l'accélération maximale entre deux valeurs de vitesses : Cette caractéristique est mise en avant pour des raisons de sécurité. Elle représente en particulier la capacité d'un véhicule léger à dépasser suffisamment rapidement un poids lourds sur une route à une voie.

5- Démarrage en côte : ce critère doit assurer l'aptitude du véhicule à redémarrer avec une vitesse suffisante s'il s'arrête sur une route avec une pente importante. La valeur de la pente admissible est un facteur dimensionnant surtout pour les véhicules de transport en commun et les poids lourds.

6- Franchissement d'un obstacle : ceci peut être un trottoir pour les véhicules particuliers ou de transport en commun ou un obstacle plus important pour des véhicules militaires par exemple (Boulon et al. 2010).

7- Manœuvres particulières pour des véhicules spéciaux.

Il n'existe pas de valeurs universelles pour fixer les paramètres dynamiques requis pour un véhicule donné. Généralement les constructeurs de véhicules automobiles et de véhicules industriels proposent plusieurs gammes de véhicules de capacités dynamiques différentes. L'acceptabilité ou l'exigence de certains niveaux de performances restent le choix de l'utilisateur du véhicule.

Dans tout ce qui suit, pour dimensionner un véhicule hybride, on se référera pour les performances dynamiques aux deux aspects suivants.

- La caractéristique d'accélération maximale sur plat. Cette caractéristique sera déduite de celles d'un véhicule hybride existant de même gamme ou de celles d'un véhicule thermique équivalent. Elle contient implicitement les renseignements concernant les critères 1, 3 et 4 énumérés plus haut.

- La valeur de la vitesse maximale en régime permanent sur une pente donnée (critère 2). Dans certains cas, cette valeur conditionne directement la taille minimale requise du moteur thermique. En effet, si la puissance instantanée du véhicule hybride peut être la somme de la puissance des deux sources thermique et électrique, il n'en est pas de même pour la puissance en régime permanent qui repose principalement sur la puissance du moteur thermique. Selon le dimensionnement en énergie de la batterie et la durée de la pente sur autoroute, la batterie peut être profondément déchargée et ne participerait plus à la puissance globale du véhicule. La taille du moteur thermique doit répondre dans ce cas à la puissance requise pour atteindre la valeur de la vitesse du critère 2 fixée par le cahier des charges.

Les autres critères peuvent être évalués après le dimensionnement à titre indicatif.

#### **4.2.1.2 Le cahier des charges énergétique**

Le véhicule hybride possède deux réservoirs d'énergie : la batterie et le réservoir de carburant. Il est indispensable de distinguer a priori avant la phase de dimensionnement, la quantité d'énergie que l'on souhaite apporter au travers de la batterie, l'autonomie principale étant assurée par le réservoir de carburant. Pour les véhicules hybrides non rechargeables, l'énergie apportée par la batterie est faible car elle est utilisée principalement pour assurer des transitoires et l'alimentation de certains auxiliaires pendant les phases d'arrêt du moteur thermique. Les batteries sont alors dimensionnées principalement en puissance. Pour des véhicules hybrides non rechargeables hautement équipés (climatisation électrique, appareil électrique de confort, multimédias, etc.), une marge d'énergie pour une durée suffisante d'alimentation par la batterie doit être prise en compte. Un cas particulier peut être également distingué : celui où le véhicule hybride non rechargeable possède une commande de mode électrique forcé lui permettant de traverser une zone ZEV (zone de payage urbain par exemple). La longueur de cette zone définit alors le dimensionnement en énergie de la batterie.

Pour les véhicules hybrides rechargeables, la quantité d'énergie amenée par la batterie fixera l'autonomie en mode électrique, ou d'une façon plus générale, la quantité d'énergie reportée sur le réseau électrique de recharge.

#### **4.2.1.3 Contraintes particulières**

Pour les véhicules hybrides rechargeables ou ceux ayant un mode ZEV (forcé ou non), deux cas de fonctionnement en mode électrique sont possibles.

- Cas où le véhicule doit assurer ses performances dynamiques du cahier des charges en mode électrique. Dans ce cas la puissance du moteur électrique et de la batterie est dimensionnée en conséquence. Nous pouvons citer comme exemple un cas extrême d'hybridation qui est le véhicule électrique avec prolongateur d'autonomie. Le mode électrique pour ce véhicule est le mode de pleine puissance, le groupe électrogène, de plus faible puissance, est utilisé occasionnellement pour augmenter l'autonomie du véhicule.

- Cas où un fonctionnement en puissance réduite est admis pour réaliser le mode électrique. Dans ce cas une puissance minimale est requise pour assurer des performances dynamiques réduites définies par le cahier des charges. Nous pouvons citer ici l'exemple d'un véhicule « full hybrid » qui possède les performances dynamiques d'un véhicule conventionnel en mode hybride et dont la chaîne électrique permet d'assurer un mode électrique de puissance réduite en zone urbaine.

## **4.2.2 Considérations préalables**

### **4.2.2.1 Couplage fort entre le dimensionnement et la loi de gestion de l'énergie**

La gestion de l'énergie du véhicule hybride est liée étroitement au dimensionnement de ses composants et inversement. Un véhicule hybride à faible taux d'hybridation ne permettra pas de réaliser un mode électrique de pleine puissance par exemple. La gestion de l'énergie doit imposer de ce fait un démarrage du moteur thermique dès des demandes de traction relativement faibles. A l'opposé, une stratégie « thermostat » (voir chapitre 3) faisant fonctionner le moteur thermique sur ses meilleurs points de rendement requiert une batterie suffisamment puissante pour assurer la traction pendant les phases d'arrêt du moteur thermique et encaisser une recharge conséquente pendant les phases de marche. Ainsi il est impératif dans une procédure de dimensionnement des composants du véhicule hybride d'avoir une idée assez précise a priori sur la loi de gestion de l'énergie qui va être utilisée.

Dans la méthodologie d'aide au dimensionnement que nous proposons, nous considérons que la loi de gestion de l'énergie est celle qui correspond à la minimisation d'un critère (la consommation de carburant dans un premier temps) et ceci pour toutes les architectures et pour tous les taux d'hybridation. Nous utiliserons alors l'une des deux méthodes d'optimisation globales détaillées dans le chapitre précédent, à savoir la programmation dynamique ou la commande optimale.

### **4.2.2.2 Dimensionnement sans « downsizing » du moteur thermique**

Le dimensionnement d'un véhicule hybride peut être effectué en partant du véhicule thermique conventionnel équivalent en conservant le moteur thermique et en ajoutant une batterie et les éléments nécessaires de conversion et de transmission. Dans ce cas, le moteur thermique est capable de fournir à lui seul les performances dynamiques requises pour le véhicule. La batterie constitue une source de puissance supplémentaire et le véhicule devient sur-motorisé.

L'avantage de ce type d'approche est de remplir d'office les critères dynamiques de 1 à 4 listés plus haut (à la masse additionnelle de la batterie près). Le véhicule hybride aurait dans le pire des cas les performances du véhicule thermique d'origine si la batterie vient à profondément se décharger. En revanche, un des inconvénients majeur est le surcoût que représente cette option. Un autre inconvénient est de disposer d'un véhicule sur-motorisé qui sera mal utilisé dans les trajets à faible sollicitation.

### **4.2.2.3 Dimensionnement avec « downsizing » du moteur thermique**

Le cas le plus intéressant dans le dimensionnement du véhicule hybride est celui où on procède à la diminution de la taille du moteur thermique dès qu'on rajoute de la puissance électrique. On parle dans ce cas du « downsizing<sup>13</sup> » du moteur thermique. Les avantages de cette option sont d'ordre économique et écologique. En effet, nous verrons plus loin que généralement un moteur thermique de plus petite taille permet de réduire les consommations de carburant sur des trajets urbains et extra-urbain. Le seul inconvénient de cette option de dimensionnement est la possibilité d'apparition d'une phase où le véhicule est sous motorisé si la batterie vient à profondément se décharger. Généralement les lois de gestion de l'énergie

---

<sup>13</sup> Ce terme est également utilisé dans les techniques de suralimentation pour augmenter le couple des moteurs thermique à cylindrée égale

doivent intégrer des limitations afin d'éviter ce genre de situations, mais la probabilité d'apparition de ce mode ne peut être réduite à zéro.

### ***4.2.3 Méthodologie d'aide au dimensionnement optimal***

Nous entendons par dimensionnement optimal une répartition des tailles des différents composants qui répond au cahier des charges fixé pour le véhicule hybride tout en optimisant un critère. Ceci correspond pour un véhicule de gamme donné et de topologie donnée à la recherche du taux d'hybridation optimal, s'il existe. Dans tout ce qui suit le critère retenu sera la consommation de carburant (émission de CO<sub>2</sub> en conséquence).

Pour réaliser un procédé d'aide au dimensionnement optimal utilisant les modèles de simulation, une taille de véhicule avec ses caractéristiques de masse et d'efforts résistants et ses performances dynamiques requises sont fixées. L'architecture hybride retenue est également fixée et les modèles direct et inverse correspondants sont établis.

En partant du point initial correspondant à un taux d'hybridation nul (véhicule thermique conventionnel) le modèle direct est utilisé en réalisant une accélération maximale. Cette accélération sera prise comme référence pour le cahier des charges dynamique du véhicule. Un incrément en puissance électrique de la batterie est ensuite réalisé tout en diminuant par la même quantité la puissance du moteur thermique (l'option choisie est ainsi le « downsizing » du moteur thermique). Cette puissance est ajustée de façon à obtenir les mêmes performances dynamiques que le véhicule de référence. Dès que cette dernière condition est réalisée, le taux d'hybridation est validé et un nouvel incrément de la puissance de la batterie est initié.

La deuxième phase de la procédure utilise le modèle inverse et un algorithme d'optimisation globale de la gestion de l'énergie (ici la programmation dynamique), ayant le cycle d'usage comme point de départ. L'utilisation du modèle inverse permet de s'affranchir de l'influence des différents régulateurs (notamment le conducteur). L'optimisation globale de l'énergie permet de s'affranchir de l'influence de la stratégie. Sur chaque cycle d'usage les véhicules correspondant à différents taux d'hybridation sont évalués et le taux d'hybridation permettant de minimiser le critère est identifié.

Une fois la procédure établie, une sensibilité à différents paramètres peut être étudiée. En particulier le cycle d'usage et l'architecture de la chaîne de tractions sont deux paramètres importants pour la qualification d'un taux d'hybridation optimal.

Cette méthodologie a été mise au point en collaboration dans l'équipe (R. Trigui et al. 2004), (M. Desbois-Renaudin et al. 2004), (Julien Scordia 2004), (Julien Scordia et al. 2009), puis améliorée dans le cadre de stage de Master (Perez 2010).

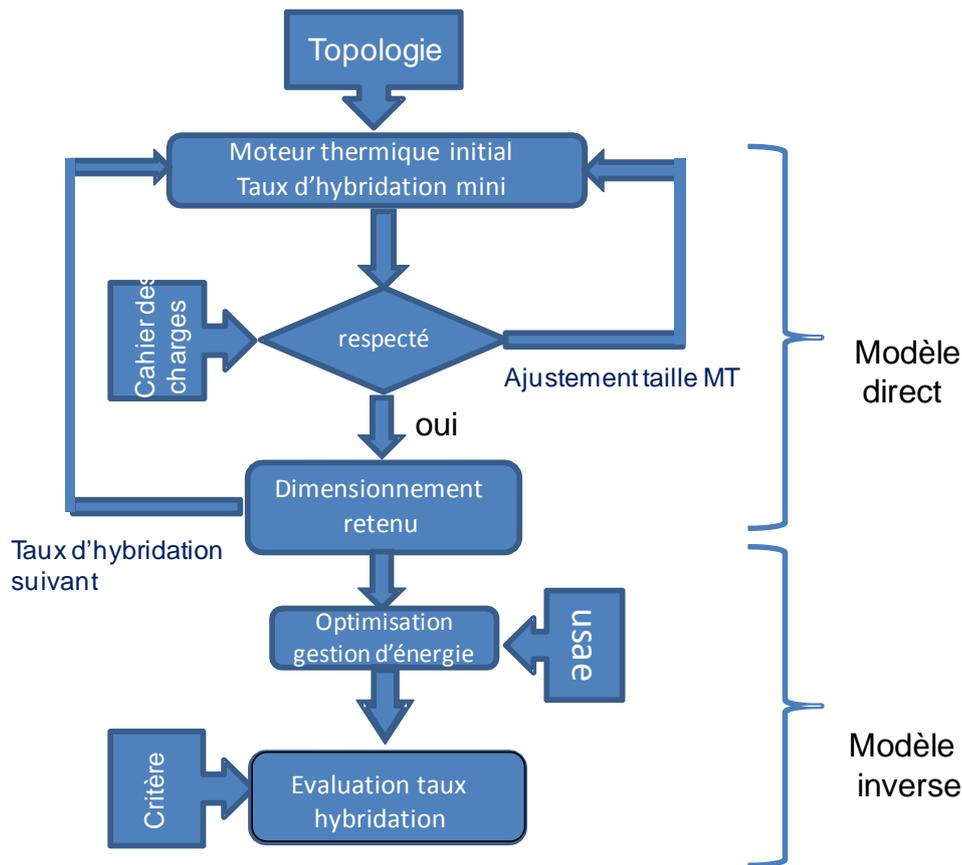


Figure 4-1 : schéma de la méthodologie d'aide au dimensionnement optimal

Des travaux postérieurs utilisant une démarche assez proche ont été rapportés dans (Sundström et al. 2008). Ces travaux utilisent également la méthode de la programmation dynamique pour la gestion de l'énergie et le logiciel Advisor (Markel et al. 2002) pour les données du modèle inverse du véhicule.

D'autres études ont tenté d'optimiser le taux d'hybridation de véhicules hybrides. Dans (Dominik Buecherl et al. 2009), un taux d'hybridation optimum pour deux gammes de véhicules hybrides parallèles a été mis en évidence. En revanche, la méthode de gestion de l'énergie utilisée est basée sur une approche de règles déterministes dont le réglage des paramètres influence directement le résultat de dimensionnement. Plus récemment, des auteurs utilisent des méthodes d'optimisation du dimensionnement basée sur des algorithmes génétiques permettant de réaliser une optimisation multi-objectifs (voir chapitre 5) du dimensionnement des composants (Assanis et al. 1999), (Hasanzadeh et al. 2005), (Desai & Williamson 2009). En revanche, dans tous ces travaux la stratégie de gestion de l'énergie qui conditionne directement les résultats repose également sur une loi à base de règles déterministes incorporée dans Advisor.

#### 4.2.4 Adaptation de la puissance des composants selon la topologie hybride

La topologie du véhicule hybride est fixée au début, en entrée de la procédure d'aide au dimensionnement. Avant de passer à la variation des puissances maximales des composants

(objet du prochain paragraphe), tout en respectant le cahier des charges dynamique, les contraintes liées à l'agencement choisi doivent être respectées.

Selon la topologie hybride, le dimensionnement de l'ACM de traction (ou EP1+EM1 dans les topologies présentées au chapitre 1) peut être directement lié au dimensionnement de la batterie ou pas (c'est pour cela que la définition du taux d'hybridation ne peut pas être réduite à la puissance de l'ACM, cf chapitre 1). Pour un taux d'hybridation donné, et donc une puissance maximale donnée de la batterie par rapport à la puissance totale requise par le véhicule, la puissance maximale de l'ACM peut être fixée selon la topologie.

En effet, pour un véhicule hybride parallèle, le flux d'énergie rentrant ou sortant de la batterie passe nécessairement par la machine électrique (EM). La batterie doit également fournir l'énergie aux auxiliaires électriques pendant le mode électrique. La relation entre les puissances maximales est alors la suivante :

$$P_{batt\_max} = P_{EM\_max} + P_{aux} \quad (4-1)$$

Selon les auxiliaires nécessaires au fonctionnement du véhicule, la puissance  $P_{aux}$  peut être négligée dans le dimensionnement.

Pour l'hybride série, la machine électrique de traction peut être alimentée par la batterie et par le groupe électrogène en même temps (mode boost). La puissance maximale requise est de ce fait :

$$P_{EM1\_max} = P_{batt\_max} + P_{ge\_max} - P_{aux} \quad (4-2)$$

Avec  $P_{ge\_max}$  la puissance électrique maximale débitée par le groupe électrogène.

Pour le véhicule hybride série-parallèle, le problème de dimensionnement des moteurs électrique est plus complexe. En effet, pendant une accélération maximale, le moteur électrique de traction  $EM1$  peut recevoir la puissance maximale de la batterie plus une part de la puissance maximale du moteur thermique. Cette part de puissance est directement liée à la puissance du deuxième moteur  $EM2$ .

La relation en puissance maximale du moteur  $EM1$  peut s'écrire :

$$P_{EM1\_max} = P_{batt\_max} + P_{EM2\_max} - P_{aux} \quad (4-3)$$

Où  $P_{EM2\_max}$  est la valeur de la puissance maximale du moteur électrique  $EM2$ . Dans le cas de l'utilisation d'un train épicycloïdal comme dans le THS (« Toyota Hybrid System ») la part de puissance dérivable depuis le moteur thermique vers le bus continu est fixée par les relations d'équilibre du train épicycloïdal en couple et en vitesse. Le dimensionnement de la puissance maximale  $P_{EM2\_max}$  tient compte de cet équilibre, notamment pour le couple maximal. La Figure 4-2 et la Figure 4-3 représentent l'exemple d'une accélération maximale de la Prius II muni de ce système. Les contraintes sur les vitesses de rotations introduites par le train épicycloïdal mènent aux limitations présentées sur la Figure 4-2. En ce qui concerne les puissances, et étant donnée la puissance maximale de la batterie (environ 25 kW), nous observons le point dimensionnant en puissance aux niveaux des machines électriques représentée par le trait en pointillé à l'abscisse 9s (Figure 4-3). C'est à partir de ce point que le

moteur thermique atteint sa puissance maximale et fournit de ce fait la puissance maximale du moteur EM2 et le complémentaire directement à la couronne (vers les roues). Après cette séquence, la relation entre les vitesses de rotations (relations de Willis) fait que la vitesse de rotation du moteur EM2 doit chuter pour maintenir la vitesse de rotation du moteur thermique, la vitesse de la couronne (ou du moteur EM1) continuant à augmenter selon la vitesse du véhicule (Figure 4-2). Ceci a pour effet la diminution de la puissance de la machine EM2 puisqu'elle équilibre toujours le train par un couple constant opposée à celui du moteur thermique à la raison du train près.

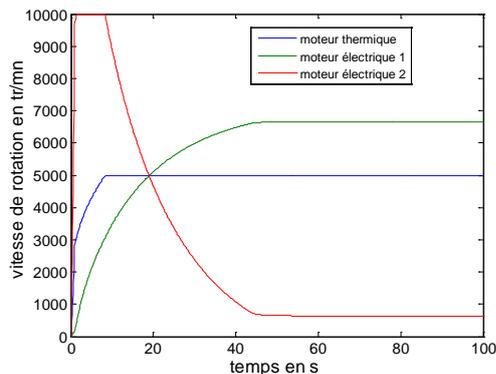


Figure 4-2 : Vitesses de rotation en accélération maximale

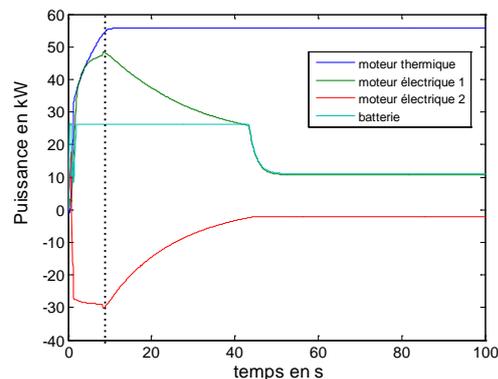


Figure 4-3 : Puissances en accélération maximale

La dernière séquence (à partir de 44 s) correspond à la limite de vitesse maximale de la machine EM1. La contribution de la batterie est limitée en conséquence.

### 4.3 Méthodes de dimensionnement des composants

Afin de réaliser la variation de puissances maximales des différents composants pour la procédure d'aide au dimensionnement, nous allons exposer, dans ce qui suit, les modèles utilisés et les méthodes de facteurs d'échelle appliquées.

#### 4.3.1 Dimensionnement du moteur thermique

Le modèle du moteur thermique utilisé pour le dimensionnement du véhicule hybride est un modèle énergétique (comportemental quasi-statique) comme décrit dans le chapitre II. Il nécessite la connaissance du domaine couple/vitesse du moteur ainsi qu'une matrice  $m_{carb}(T_{ICE}, \Omega_{ICE})$  de consommation de carburant en fonction des deux variables couple et vitesse.

Le processus de l'aide au dimensionnement optimal nécessite pour chaque type de technologies de moteur, essence ou diesel, la disponibilité d'une gamme de moteur de différente puissance. Ceci implique d'une part l'existence ou la conception de ces moteurs et d'autre part des essais au banc pour identifier les paramètres nécessaires.

Afin de réaliser une variation du taux d'hybridation en vue de la recherche du meilleur dimensionnement pour un véhicule hybride de topologie et de taille données, nous allons considérer un moteur de référence disponible dans la base de données de VEHLIB. A partir

du modèle de ce moteur, des homothéties (ou facteurs d'échelle) sur l'espace couple/vitesse ainsi que sur le débit de carburant, sur la masse et sur l'inertie seront pratiquées.

Soit  $P_{ICE\_max}$  la puissance maximale du moteur thermique souhaité. On note le rapport d'homothétie  $k_{h\_ICE}$  le rapport entre la puissance maximale du moteur de référence et celle du moteur souhaité :

$$k_{h\_ICE} = \frac{P_{ICE\_max}}{P_{ICE\_max\_ref}} \quad (4-4)$$

Ce paramètre sera appliqué au couple maximal, au couple minimal, à la masse et à l'inertie. En revanche, pour la consommation, nous considérerons dans la procédure de dimensionnement l'une ou l'autre des deux hypothèses suivantes.

Hypothèse 1 : Deux moteurs de même technologie mais de tailles différentes auront les mêmes consommations pour un point de fonctionnement donnée en couple et en vitesse. Dans ce cas, la cartographie du moteur de référence (Figure 4-4) garde les mêmes isovalues de consommation spécifiques. Seuls l'espace couple vitesse est modifié (Figure 4-5).

Hypothèse 2 : Un moteur thermique de plus petite taille aura des consommations spécifiques plus faibles que le moteur de référence. Dans ce cas, les consommations spécifiques du moteur de référence seront multipliées par le rapport d'homothétie de l'équation 4-4. Ce cas est représenté sur la Figure 4-6.

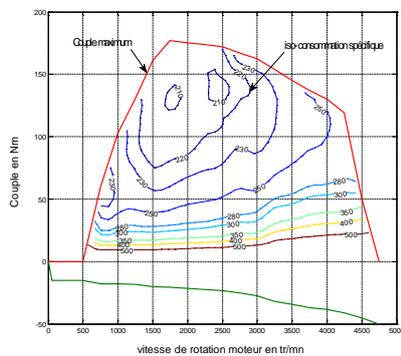


Figure 4-4 : cartographie du moteur de référence

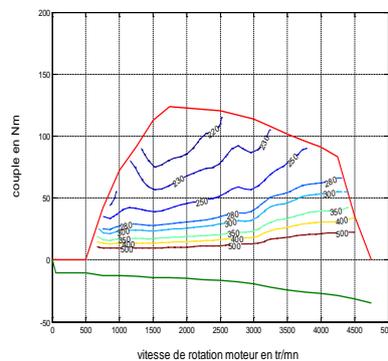


Figure 4-5 : cartographie du moteur déduit hypothèse 1

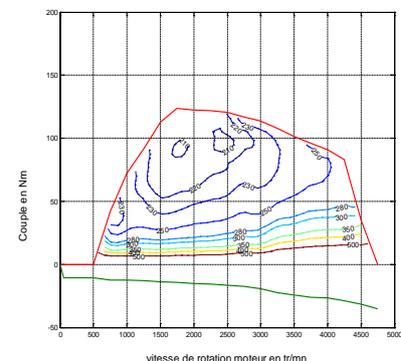


Figure 4-6 : cartographie du moteur déduit hypothèse 2

En réalité, la première hypothèse est pessimiste vis-à-vis de la consommation de carburant et correspond au cas d'une limitation de couple pour un moteur afin de limiter ses performances (au facteur sur la masse près). La deuxième hypothèse est en revanche optimiste pour le downsizing puisque la consommation est diminuée par un rapport correspondant au ratio de puissances, ce qui est sur-estimé. En effet, les moteurs de grande taille (pour les poids lourds par exemple) ont généralement une  $CSP_{min}$  plus petite que les moteurs automobiles. La considération des deux cas permet de borner le domaine des solutions possibles où la solution la plus réaliste se trouvera.

En considérant ces deux hypothèses, les paramètres du moteur thermique déduits du moteur de référence sont les suivants :

Tableau 4-1 : facteur d'échelle pour le moteur thermique. Hypothèse 1 et 2.

variable	Facteur d'échelle Hypothèses 1 et 2
$T_{ICE\_max}$	$k_{h\_ICE} T_{ICE\_max\_ref}$
$\Omega_{ICE\_max}$	$\Omega_{ICE\_max\_ref}$
$M_{ICE}$	$k_{h\_ICE} M_{ICE\_ref}$
$J_{ICE}$	$k_{h\_ICE} J_{ICE\_ref}$

variable	Hypothèse 1	Hypothèse 2
$m_{carb}(T_{ICE}, \Omega_{ICE})$	$m_{carb\_ref}(T_{ICE}, \Omega_{ICE})$	$k_{h\_ICE} m_{carb\_ref}\left(\frac{T_{ICE}}{k_{h\_ICE}}, \Omega_{ICE}\right)$

L'hypothèse 2, qui est celle implémentée dans le logiciel Advisor, a été utilisée par plusieurs auteurs pour réaliser des études de dimensionnement de véhicules hybrides (Holder & Gover 2006), (Desai & Williamson 2009). D'autres utilisent la formulation de Willans qui permet d'exprimer la pression effective moyenne en utilisant une approximation linéaire en fonction de l'efficacité et de la pression moyenne de frottement (Sundström et al. 2008), (Assanis et al. 1999), (Fellini et al. EcoDesign'99), (Knöke & Böcker 2007). Cette fonction efficacité ainsi que la pression moyenne de friction sont identifiées expérimentalement en faisant varier la vitesse de rotation du moteur. Cette méthode, bien que basée sur des formulations empiriques en rapport avec les phénomènes physiques dans le moteur, introduit une erreur sur la consommation visibles sur la cartographie du moteur de référence (Sundström et al. 2008). Le facteur d'échelle, qui peut aussi introduire d'autres écarts n'a pas été validé par les auteurs.

Dans le cas d'application que nous proposons dans la suite nous considérerons les deux hypothèses 1 et 2 décrites ci dessus. Ceci permettra d'identifier la dispersion des résultats introduite par ce type d'hypothèses.

### 4.3.2 Dimensionnement de l'association convertisseur machine électrique

Dans la procédure de dimensionnement du véhicule hybride, nous utiliserons le modèle énergétique (comportemental quasi statique) décrit dans l'annexe 3 pour le moteur électrique associé à son convertisseur. Ce modèle requière la connaissance des valeurs du couple maximal et minimal en fonction de la vitesse de rotation pour délimiter l'espace couple vitesse (Figure 4-7). Une cartographie du rendement (ou des pertes) de l'ensemble convertisseur-machine est également nécessaire (Figure 4-8), en plus des données concernant la masse de l'ensemble et l'inertie de la machine. Comme pour le moteur thermique, ces caractéristiques sont issues de mesures sur les bancs d'essais ou proviennent de modèles de niveau supérieur (modèle à constante localisées de la machine associé à un modèle moyen de convertisseur par exemple).

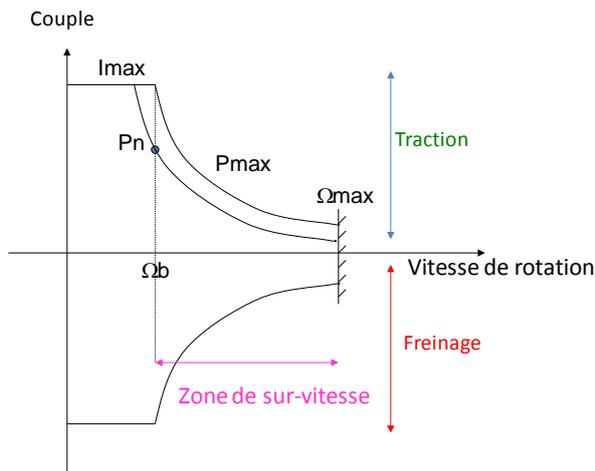


Figure 4-7 : espace couple vitesse de l'association convertisseur machine.

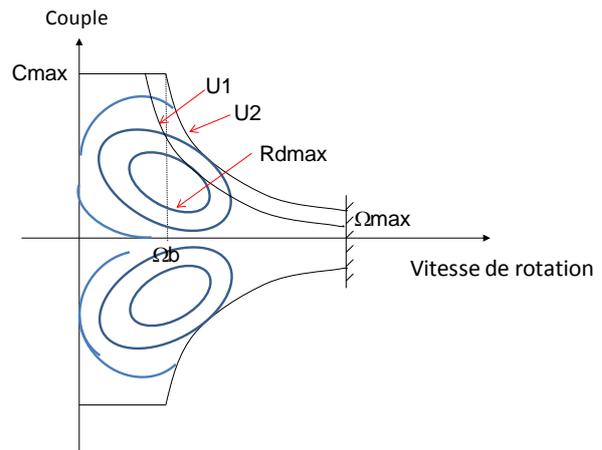


Figure 4-8 : iso-valeur de rendement et variation de la caractéristique du couple maximal avec la tension d'alimentation

Comme pour le moteur thermique, des modèles d'une gamme suffisamment large d'ACM sont nécessaires à la réalisation de la procédure d'aide au dimensionnement optimal. Généralement les essais de laboratoires concernent un type et un dimensionnement donnés d'une ACM, sans correspondre nécessairement à la taille requise dans un véhicule hybride donné. Les modèles à constantes localisées nécessitent également plusieurs essais de validation et d'identification de paramètres, notamment pour tenir compte de phénomènes non linéaires comme la saturation magnétique.

#### 4.3.2.1 Utilisation d'homothéties à partir d'une ACM de référence :

Une réponse en première approximation au problème posé par la disponibilité de base de données suffisante d'ACM consiste à utiliser des données d'une ACM existante comme modèle de référence. A partir de ce modèle des homothéties sont pratiquées sur différents paramètres de l'ACM pour passer à un modèle correspondant à une ACM de même type mais de puissance différente. Cette méthode a été utilisée dans la littérature pour des objectifs similaires au notre à savoir la recherche du taux d'hybridation optimal (Sundström et al. 2008), (Holder & Gover 2006).

En utilisant ce principe, la procédure de passage d'un modèle d'ACM à un autre est déclinée comme suit.

Au niveau des hypothèses nous supposons que :

- toute la gamme d'ACM déduite est de même technologie (asynchrone, synchrone à aimant permanent ou synchrone bobiné) que l'ACM de référence,
- la plage de vitesse de rotation est conservée, toutes les ACMs de la gamme ont de ce fait la même vitesse de base et la même vitesse maximale.
- la tension d'alimentation nécessaire varie linéairement avec la puissance (cette hypothèse est importante pour le dimensionnement de la batterie)

Au niveau du facteur d'échelle la démarche est la suivante.

Soit  $P_{ME\_max}$  la puissance maximale souhaitée de l'ACM. On note le rapport d'homothétie  $k_{h\_ME}$  le rapport entre la puissance maximale de l'ACM de référence et de l'ACM souhaitée :

$$k_{h\_ME} = \frac{P_{ME\_max}}{P_{ME\_max\_ref}} \quad (4-5)$$

Dans une première approximation nous supposons une puissance massique et volumique constante sur toute la gamme selon l'équation :

$$P_{ME\_max} = P_{vol} D^2 L \quad (4-6)$$

Où  $D$  est le diamètre de la machine,  $L$  est sa longueur et  $P_{vol}$  le coefficient de linéarité correspondant à la puissance volumique.

En ce qui concerne la masse de la machine recherchée, le facteur  $k_{h\_ME}$  est applicable directement sur la masse de référence dans ce cas d'hypothèse. En revanche, pour le calcul de la nouvelle inertie, plusieurs hypothèses sont possibles :

1) seule la longueur de la machine est augmentée du facteur  $k_{h\_ME}$ . L'inertie est dans ce cas  $J_{ME} = k_{h\_ME} J_{ME\_ref}$ ,

2) seul le diamètre de la machine est augmenté du facteur  $\sqrt{k_{h\_ME}}$ . L'inertie est dans ce cas  $J_{ME} = (k_{h\_ME})^2 J_{ME\_ref}$ ,

3) les deux dimensions sont augmentées par un facteur  $\sqrt[3]{k_{h\_ME}}$ . L'inertie est dans ce cas  $J_{ME} = (k_{h\_ME})^{\frac{5}{3}} J_{ME\_ref}$ .

D'autres combinaisons sont possibles mais dans tout ce qui suit nous nous limitons à la dernière hypothèse.

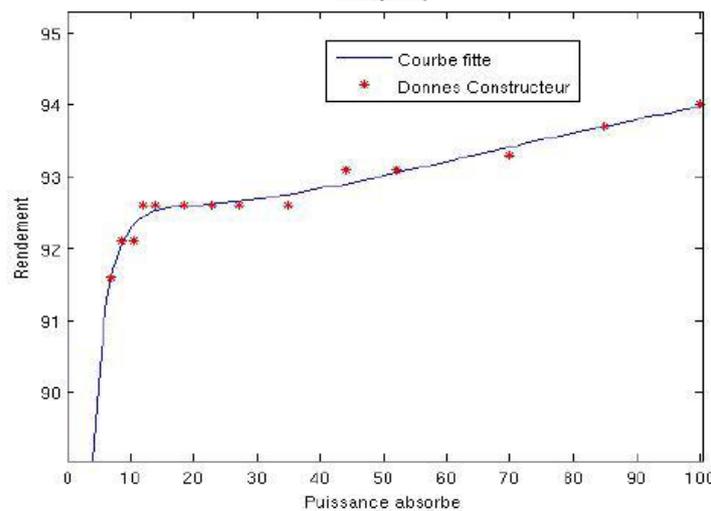
Pour la puissance, nous reportons tout le facteur d'échelle sur le couple en conservant la vitesse de rotation. Pour les pertes de l'ACM nous supposons que le rendement d'un point de fonctionnement  $(T_{ME}, \Omega_{ME})$  correspond au rendement de l'ACM de référence au point de fonctionnement  $(\frac{T_{ME}}{k_{h\_ME}}, \Omega_{ME})$ , ce qui représente une hypothèse optimiste pour les petites puissances.

Les paramètres de l'ACM déduite de l'ACM de référence sont alors les suivants :

**Tableau 4-2 : Paramètres de l'ACM déduite par rapport à la référence**

$T_{ME\_max}$	$k_{h\_ME} T_{ME\_max\_ref}$
$\Omega_{ME\_max}$	$\Omega_{ME\_max\_ref}$
$\eta_{ME}(T_{ME}, \Omega_{ME})$	$\eta_{ME\_ref} \left( \frac{T_{ME}}{k_{h\_ME}}, \Omega_{ME} \right)$
$M_{ME}$	$k_{h\_ME} M_{ME\_ref}$
$J_{ME}$	$J_{ME} = (k_{h\_ME})^{\frac{5}{3}} J_{ME\_ref}$
$U_{ME\_nom}$	$k_{h\_ME} U_{ME\_nom\_ref}$

Il faut noter qu'en choisissant cette option d'homothétie toutes les ACMs déduites auraient le même rendement maximal que l'ACM de référence. Or, généralement, le rendement maximal d'ACMs de plus grande puissance est supérieur à celui des ACMs de plus petites puissances. Une étude rapportée dans (Perez 2010) a proposée un facteur de correction suite à l'examen d'un échantillon de machine électrique de type synchrone à aimant permanent selon des catalogues de constructeurs.



**Figure 4-9 : Rendement en fonction de la puissance de machine synchrone à aimant permanent**

Afin de s'approcher d'un comportement plus réaliste de la technique d'homothétie, il est possible de tenir compte de ce facteur de correction en appliquant une variation linéaire comme suit :

$$\eta_{ME}(T_{ME}, \Omega_{ME}) = \eta_{ME\_ref} \left( \frac{T_{ME}}{k_{h\_ME}}, \Omega_{ME} \right) * (a + b k_{h\_ME}) \quad (4-7)$$

L'avantage non négligeable de la méthode utilisant les facteurs d'échelle est sa simplicité et son faible coût tout en se référant à des données expérimentales d'ACMs existantes. En

revanche, la précision est difficile à évaluer sans validation à minima des points de puissances extrêmes.

D'autres méthodes pour déduire des modèles énergétiques à partir de machines existantes, utilisant également l'hypothèse d'une puissance massique et volumique constante, définissent deux facteurs d'échelle correspondant à l'une ou l'autre des dimensions de la machine (L,D). Ensuite ces facteurs sont utilisés pour déduire les paramètres du modèle électrique équivalent à partir du modèle de la machine de référence (D. Buecherl et al. 2010). Seulement, dans ces travaux, aucun résultat expérimental n'a été donné pour montrer la validité de cette approche.

#### **4.3.2.2 - Utilisation d'un algorithme de dimensionnement d'ACM**

Une autre possibilité pour pallier à l'inexistence d'une base de données suffisante pour renseigner les modèles énergétiques de l'ACM consiste à utiliser des algorithmes de dimensionnement d'ACMs. Ces algorithmes utilisent le cahier des charges des machines électriques en termes d'espace couple-vitesse, d'encombrement et de tension d'alimentation pour définir en sortie une machine avec sa géométrie, ses caractéristiques électriques et magnétiques ainsi qu'un convertisseur associé. Pour le dimensionnement de la machine plusieurs méthodes sont possibles.

- Méthode des éléments finis. Cette méthode, complexe et lente mais la plus complète et la plus précise, constitue la méthode de référence dans la conception des machines électriques (Wu et al. 2009), (Faiz & Moayed-Zadeh 2005), (Aubertin et al. 2008), (Foggia et al. 1975), (Vassent et al. 1991). Elle permet de définir la géométrie exacte de la machine ainsi que tous les éléments nécessaires à sa conception (type et quantité de bobinage, taille et position des aimants, matériaux utilisés...). Elle permet également, à partir d'outils associés, de renseigner le modèle à constantes localisées de la machine (modèle équivalent électrique) et de calculer les différentes pertes dans la machine.

- Méthode analytique basée sur une approche empirique et experte. Cette méthode utilise des relations empiriques reliant les différents paramètres de conception de la machine (Boldea & Nasar 2002), (Huang et al. 1998). Ces relations sont issues de lois géométriques et électromagnétiques étendues et validées par l'expérience ou par la méthode des éléments finis. La méthode analytique présente l'avantage d'être rapide mais elle est moins précise que les éléments finis. Une tentative de mettre en œuvre un algorithme de ce type pour la génération de cartographie de moteur asynchrone associé à son convertisseur utilisable directement dans VEHLIB a été réalisée au cours d'un stage de Master (Legranger 2005), (Legranger et al. 2006). La démarche et quelques résultats sont donnés en annexe 9.

### **4.3.3 Dimensionnement de la batterie**

La batterie est l'élément le plus sensible de l'hybridation. Son dimensionnement représente une tâche délicate mais dont l'enjeu est important. Même si dans un premier temps certains paramètres ne sont pas pris en compte dans le processus d'aide au dimensionnement, nous tenons ici à souligner les différents aspects à considérer.

#### **4.3.3.1 Rappels et définitions**

Rappelons ce que nous avons évoqué dans le chapitre 1, à savoir que pour le choix d'une batterie dans une application véhicule hybride, il existe plusieurs critères à prendre en compte dont les plus importants sont :

- la puissance massique et volumique,
- l'énergie massique et volumique,
- le rendement,
- la durée de vie,
- le coût.

Rappelons également que la batterie est composée d'accumulateurs élémentaires dont la tension dépend du potentiel électrochimique du couple d'oxydoréduction qui les constitue (Tableau 4-3). Ainsi pour le dimensionnement en tension de la batterie, cette tension élémentaire constitue une limite inférieure. La tension globale de la batterie est également un multiple entier de cette tension élémentaire. Un autre aspect à prendre en compte concerne la sensibilité de cette valeur de tension à l'état de charge et à la température. La définition d'une tension élémentaire nominale  $U_{ele\_n}$  peut donc varier selon les hypothèses considérées : à vide ou à courant maximal, à 0 ou à 20 °C, batterie pleine ou déchargée, ...

**Tableau 4-3 : Tension nominale par élément selon le couple électrochimique**

	Plomb	NiCd	NiMh	NaNiCl2	LiPh	Li-Ion	LiPol
Tension nominale d'un élément	2V	1,2 V	1,2 V	2,6 V	3,2 V	3,6 V	3,7

En ce qui concerne la capacité, elle est directement liée à la masse de matière active mobilisée pour réaliser l'élément. Ainsi, pour un même couple électrochimique, un élément peut avoir une gamme très étendue de capacités possibles qui dépendent directement de sa taille et de sa masse. Certaines applications comme les appareils portables de petites tailles disposent de batteries ne dépassant pas quelques dizaines de mAh. A l'opposé, des batteries de démarrage pour des véhicules diesel lourds par exemple disposent d'éléments de plusieurs dizaines d'Ah.

Dans la communauté des batteries, la capacité d'une batterie est généralement noté C (ou  $C_n$  pour parler de capacité nominale) et exprimée en Ah. Il existe en revanche des abus de notation qu'il est nécessaire de connaître pour comprendre les performances d'une batterie. En effet le courant qui traverse une batterie est généralement exprimé en nombre de  $C_n$ . On dit qu'une batterie est déchargée sous un courant de  $1C_n$  si la décharge complète de Soc=100% à Soc=0% dure une heure. Un courant de  $2C_n$  permet de décharger la batterie en une demi-heure si l'effet du courant sur la capacité est négligeable. Quoi qu'il en soit, le courant de  $2C_n$  est le double du courant  $1C_n$  qui généralement est pris pour référence (Pelissier 2010).

Nous pouvons ainsi définir l'énergie, la puissance maximale en décharge et la puissance maximale en recharge d'un élément par :

$$E_{ele\_n} = U_{ele\_n} C_n \quad (4-8)$$

$$P_{ele\_dech\_max} = U_{ele\_n} N_{dech\_max} C_n \quad (4-9)$$

$$P_{ele\_rech\_max} = -U_{ele\_n} N_{rech\_max} C_n \quad (4-10)$$

Avec  $N_{dech\_max} C_n$  le courant maximal de décharge exprimé en nombre de  $C_n$  et  $N_{rech\_max} C_n$  la valeur absolue du courant maximal de recharge.

#### 4.3.3.2 Batterie de puissance et batterie d'énergie

Selon leur puissance massique et leur énergie massique, les batteries peuvent être considérées comme étant de type puissance ou de type énergie. La Figure 4-10 représente dans l'espace de Ragone les couples électrochimiques usuels.

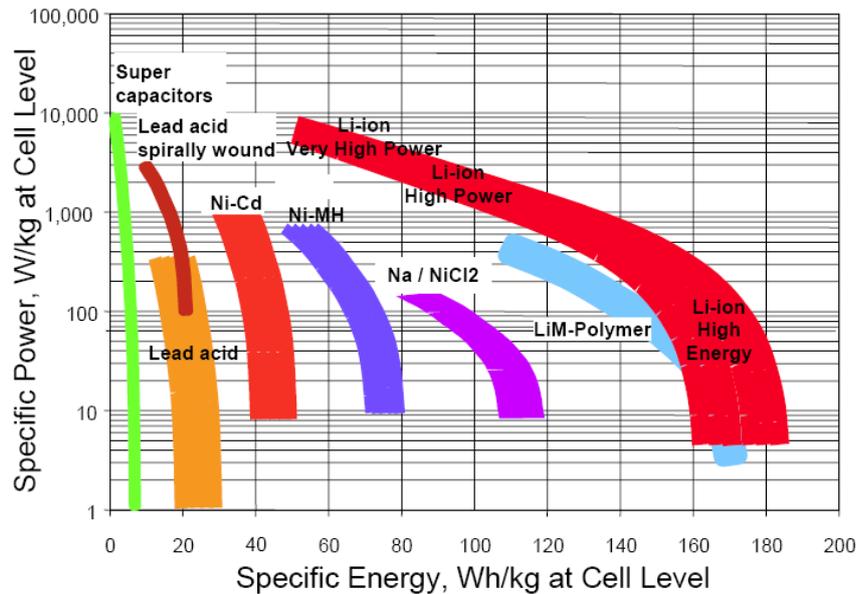


Figure 4-10 : Diagramme de Ragone des technologies de batteries les plus utilisées (source SAFT dans (Kalhammer et al. 2007))

On peut remarquer que pour une même technologie de batterie, la gamme de puissance massique varie suffisamment pour pouvoir distinguer des batteries de puissance. Si l'on considère le seuil de 100 W/kg comme exemple de limite, tous les couples électrochimiques représentés sur le diagramme peuvent fournir des batteries de puissance selon ce critère.

La différence fondamentale entre les batteries de puissance et les batteries d'énergie pour un couple électrochimique donné provient essentiellement de la variation du rapport entre la surface active et l'épaisseur des électrodes. Dans une batterie de puissance, la surface active des électrodes est augmentée en augmentant la porosité, ce qui entraîne une diminution de la densité de la matière active et donc de l'énergie (Maxime Montaru 2009).

La géométrie des éléments peut également jouer pour augmenter davantage la puissance massique comme c'est le cas des cellules de type prismatique par rapport aux cellules de forme cylindrique.

Typiquement une batterie de puissance peut être sollicitée avec un courant maximal généralement supérieur à  $5C_n$  (plus de  $15C_n$  pour certains couples à base de Lithium). En revanche, une batterie d'énergie ne dépasse généralement pas  $2C_n$  en courant maximal.

Pour un véhicule hybride sans recharge extérieure, la batterie est généralement contrôlée en mode flottant et l'énergie requise est relativement faible. Dans ce cas on utilise plutôt des batteries de puissance. Dans les véhicules électriques des batteries d'énergie sont requises

étant donné le besoin d'autonomie. Pour des véhicules hybrides rechargeables des batteries de type intermédiaire sont nécessaires pour répondre à la fois aux besoins de puissance et d'énergie.

#### 4.3.3.3 Caractéristique de charge et de décharge

Un élément important à prendre en compte dans le dimensionnement de la batterie est la dissymétrie qui existe entre la puissance de charge et la puissance de décharge, dissymétrie fortement dépendante de l'état de charge (Figure 4-11, (INNEEL & DOE 2003))

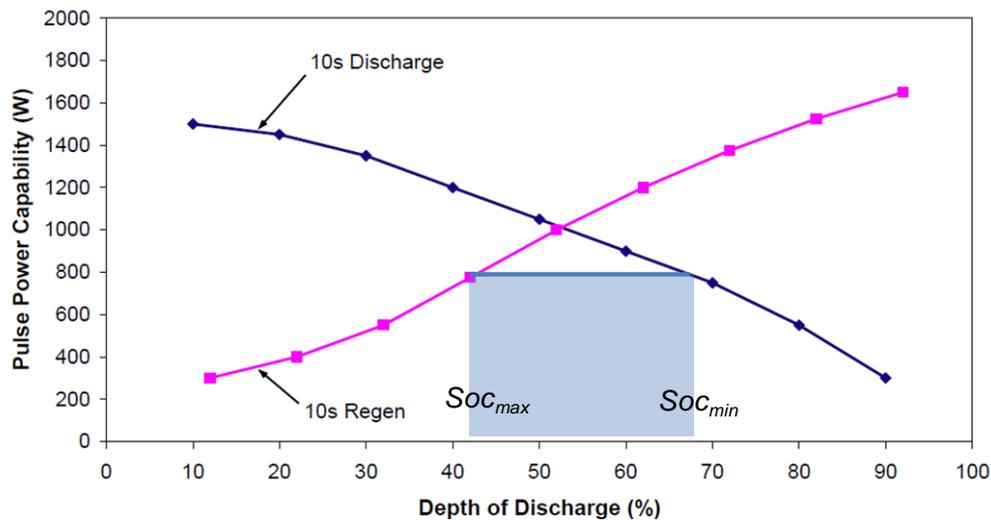


Figure 4-11 : Variation de la puissance de charge et de décharge selon la profondeur de décharge de la batterie (INNEEL & DOE 2003)

Ainsi deux contraintes sont à prendre en compte.

- Pour le véhicule hybride non rechargeable, si la batterie doit assurer une puissance minimum en décharge pour respecter le cahier des charges dynamique, il est important de définir un  $Soc$  minimum à respecter en conséquence. Pour favoriser la récupération d'énergie au freinage, il faut également que la batterie soit capable d'accepter des puissances de recharges suffisantes. Un  $Soc$  maximal est alors requis. Ainsi, comme le montre la Figure 4-11, si des performances constantes en puissance sont requises, il est impératif de limiter la fenêtre d'utilisation de la batterie pendant son utilisation.

- Pour un véhicule hybride rechargeable le problème est plus complexe car il faut que la batterie assure également la fourniture d'une quantité d'énergie définie dans le cahier des charges. Pour cela, la plage  $[Soc_{min}, Soc_{max}]$  doit permettre d'assurer la quantité d'énergie visée. Un compromis entre la puissance maximale et l'énergie disponible doit ainsi être trouvé.

#### 4.3.3.4 Dimensionnement des batteries pour le véhicule hybride

Afin d'atteindre les objectifs de puissance, d'énergie et de tension fixés par le cahier des charges, les éléments de batteries sont agencés en série ou en parallèle pour former un Pack. Pour un élément donné, la mise en série permet d'augmenter la tension et la mise en parallèle permet d'augmenter la capacité et le courant maximal. Une étape intermédiaire peut consister à réaliser des mono-blocs qui sont connectés ensuite pour former des Packs. Cette opération, bien qu'elle défavorise l'intégration optimale des cellules, permet aux constructeurs de

batterie de proposer des produits de différentes caractéristiques disponibles sur étagères. La réalisation de pack dans ce cas peut être prise en charge par le constructeur du véhicule.

Dans tout ce qui suit, nous nous référons à la tension nominale d'élément et au courant maximal en charge et en recharge qui tient compte de la variation de la puissance maximale en fonction de l'état de charge.

La tension nominale du pack est calculée comme suit :

$$U_{batt\_n} = N_{ele\_serie} U_{ele\_n} \quad (4-11)$$

Où  $N_{ele\_serie}$  est le nombre d'élément en série sur une branche.

La capacité de la batterie est donnée par :

$$C_{batt\_n} = N_{branch\_par} C_{ele\_n} \quad (4-12)$$

Avec  $N_{branch\_par}$  le nombre de branches mises en parallèle.

Les courants maximaux de charge et de décharge s'écrivent :

$$I_{batt\_dech\_max} = N_{dech\_max} C_{batt\_n} N_{branch\_par} \quad (4-13)$$

$$I_{batt\_char\_max} = -N_{char\_max} C_{batt\_n} N_{branch\_par} \quad (4-14)$$

La construction de packs de batterie à partir des cellules élémentaires doit intégrer également un dispositif de refroidissement et éventuellement de chauffage dont la mission est de maintenir la température de la batterie dans une plage admissible. Plusieurs types de refroidissements peuvent être envisagés : par convection naturelle, par convection forcée ou par circulation de liquide. Selon le type de refroidissement, les puissances consommées par le dispositif peuvent ne pas être négligeables, comme c'est présenté sur la Figure 4-12 où une puissance de type permanent est attendue (Bitsche & Gutmann 2004), correspondant au cas le plus défavorable d'usage.

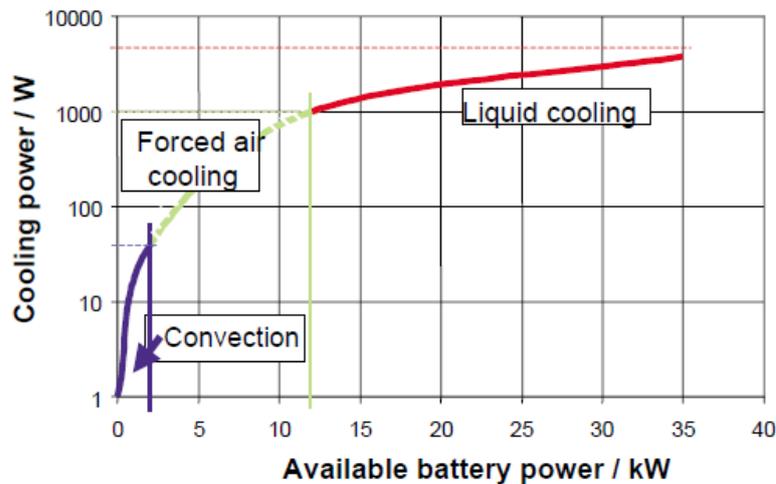


Figure 4-12 : Puissance de refroidissement nécessaire selon la puissance en continue de la batterie (Bitsche & Gutmann 2004).

Nous supposons pour les procédures de dimensionnement que la gestion thermique des batteries assure une température de fonctionnement dans la plage admissible en intégrant une consommation forfaitaire ajoutée à la puissance des auxiliaires selon un coefficient multiplicatif comme suit :

$$P_{aux} = P_{aux\_n} + k_{refroid} P_{batt} \quad (4-15)$$

Pour la masse du pack batterie nous considérons la masse totale des éléments augmentée de la masse nécessaire à la réalisation du pack (connectique, boîtiers, ...), du BMS et du dispositif de refroidissement. Nous considérons également un coefficient multiplicatif de la façon suivante :

$$M_{pack} = (N_{ele\_serie} N_{branch\_par} M_{ele}) k_{pack} \quad (4-16)$$

## 4.4 Application : aide au dimensionnement d'un véhicule hybride parallèle diesel

### 4.4.1 Cahier des charges et hypothèses de calcul

Nous nous proposons ici d'étudier l'hybridation de type parallèle à deux embrayages d'un véhicule thermique diesel dont les caractéristiques sont présentées sur le Tableau 4-4. Cette hybridation sera réalisée en choisissant l'option d'un « downsizing » du moteur thermique.

Tableau 4-4 : Caractéristique du véhicule diesel de référence avant hybridation

	value	unit		value	unit
<b>Chassis</b>			<b>Embrayge</b>		
Masse	1335	kg	Rayon	0,15	m
Sf	2,25	m2	coeff. Frict.	0,28	/
Cx	0,32	/	<b>MT</b>		
Coef roul.	0,0106	/	type	Diesel CIDI	
<b>Roues</b>			Cylind.	2000	.cc
Nombre	4	/	Puiss Max.	110 @4000	kW@rpm
Inertie	0,7	Kgm2	Vit max	5000	rpm
rayon	0,32	m			
<b>Boîte de vitesse</b>			<b>Boîte de vitesse</b>		
.	rapport	rendement	.	rapport	rendement
1 <sup>er</sup> R	3,81	0,90	4 <sup>ème</sup> R	0,96	0,98
2 <sup>nd</sup> R	2,16	0,97	5 <sup>ème</sup> R	0,74	0,98
3 <sup>ème</sup> R	1,30	0,98	6 <sup>ème</sup> R	0,61	0,98

Pour cela, nous considérons les performances dynamiques de ce véhicule, représentées sur la Figure 4-13, comme performances de référence à respecter par les différents dimensionnements hybrides. Dans un premier temps nous laissons libre la contrainte 2 du

cahier des charges dynamique (vitesse maximale en pente) que nous mettrons en évidence ensuite à partir des résultats.

Nous considérons ici que l'hybridation souhaitée concerne le cas d'un hybride non rechargeable et où aucune contrainte a priori n'est émise quant à la puissance du mode électrique (puissance réduite admise).

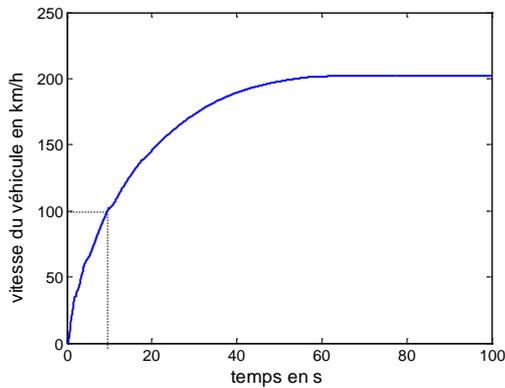


Figure 4-13 : Performances dynamique de référence

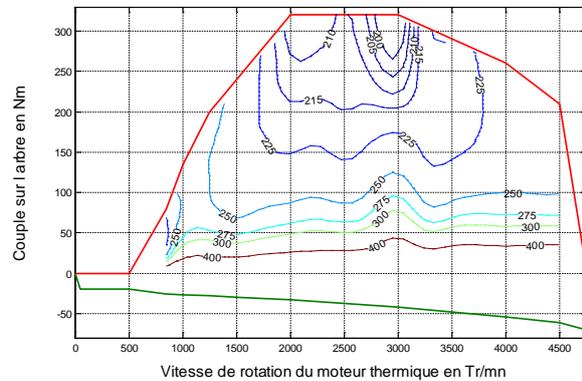


Figure 4-14 : cartographie du moteur thermique de référence

Le moteur thermique de référence est le moteur du véhicule thermique dont la cartographie est donnée sur la Figure 4-14. Le moteur électrique de référence est un moteur synchrone à aimant permanent de 30 kW du fabricant « Unique Mobility » et dont la cartographie est donnée sur la Figure 4-15. La batterie est de type Li-Ion. Les caractéristiques principales d'un élément sont résumées sur le Tableau 4-5.

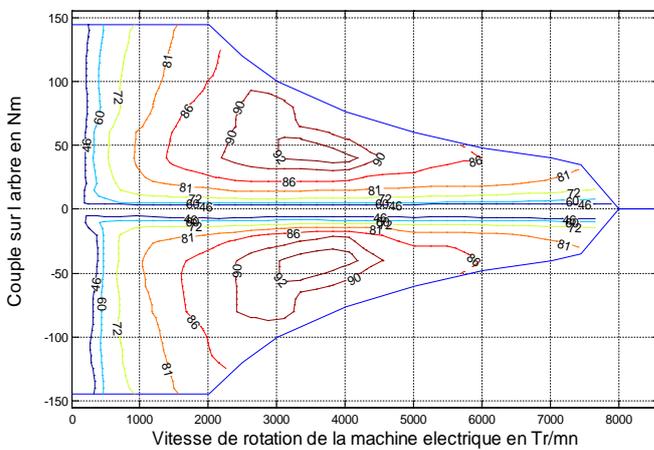


Figure 4-15 : cartographie de l'ACM de référence.

Type	LiFePO4
Fabricant	OMT
Capacité nominale	8 Ah
Tension nominale	3,2
Courant max dech	200A (25 C)
Courant max rech	80 A (10 C)
Résistance interne	<4 mΩ
Masse d'un élément	0.43 kg
Nb Cycle @ 20% de Soc et 25 °C	2000

Tableau 4-5 : Caractéristique des batteries utilisées dans les simulations

Dans cette étude nous considérons les deux types d'hypothèses (1 et 2) pour le facteur d'échelle du moteur thermique. Rappelons que l'hypothèse 1 est une simple limitation des performances du moteur en conservant les consommations spécifiques.

Dans un premier temps on néglige la puissance de refroidissement de la batterie ( $k_{refroid} = 0$ ) et nous considérons une masse additionnelle forfaitaire de 30% de la masse de

l'ensemble des éléments de la batterie soit  $k_{pack} = 1,3$ . Nous rappelons que cette masse additionnelle concerne la mise en pack, le BMS et le dispositif de refroidissement.

#### 4.4.2 Gestion de l'énergie

La gestion de l'énergie utilisée dans cette procédure est donnée par un algorithme basé sur la programmation dynamique (cf chapitre 3). Nous rappelons que ce type de méthodes permet de calculer la stratégie optimale globale pour un profil de vitesse connu à l'avance. Les résultats de simulation d'un véhicule hybride donné utilisant cette méthode représentent en termes de consommation un potentiel inatteignable (à la précision du modèle et de la discrétisation près), mais qui permet de comparer les différents véhicules hybrides. Nous rappelons ici que le véhicule hybride visé est de type non rechargeable, la gestion de la batterie est alors de type « charge sustaining ». Pour cela d'une part, et pour avoir une comparaison équitable entre les véhicules simulés d'autre part, nous nous fixons pour chaque calcul la contrainte d'un  $Soc_{final}$  de la batterie égal au  $Soc_{initial}$ .

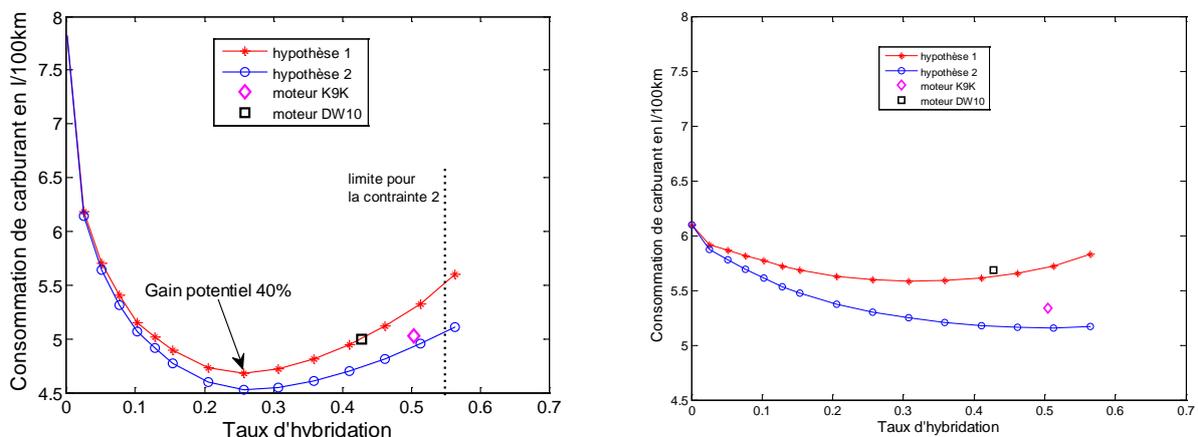
#### 4.4.3 Résultats et discussion

##### 4.4.3.1 Taux d'hybridation optimal

Afin d'étudier la variation de la consommation optimale de carburant (et en conséquence les émissions de CO2) avec le taux d'hybridation, l'algorithme décrit sur la Figure 4-1 est appliqué.

Les taux d'hybridation répondant au cahier des charges dynamique sont retenus et les modèles de leurs composants sont obtenus en utilisant les facteurs d'échelle décrit plus haut. A l'aide de la programmation dynamique et du modèle inverse, différents cycles de vitesses sont simulés pour chaque véhicule hybride correspondant à un taux d'hybridation.

Les consommations de carburant en fonction du taux d'hybridation sont données sur la Figure 4-16 a) pour un cycle urbain et b) pour un cycle autoroutier et ceci dans les deux cas d'hypothèse de dimensionnement du moteur thermique (hypothèse 1 et 2)



a) Cycle urbain : HYZURB

b) Cycle autoroutier : HYZAUTO

Figure 4-16 : Consommation optimale selon le taux d'hybridation et selon les hypothèses

Nous remarquons que pour le cycle urbain, et dans les deux cas d'hypothèses de méthode de dimensionnement du moteur thermique (Figure 4-16 a)), un optimum de taux d'hybridation apparaît autour de 0,25. Une hybridation plus importante mènerait dans ce cas à un résultat inverse de l'effet désiré qui est la minimisation de la consommation de carburant. Cette conclusion n'est pas valable pour le cycle autoroutier qui présente un optimum de taux d'hybridation à environ 0,3 pour l'hypothèse 1 et à environ 0,5 dans le cas de l'hypothèse 2.

Dans les deux cas, le poids du type d'hypothèse de dimensionnement du moteur thermique apparaît nettement vers les forts taux d'hybridation.

Rappelons que seul le moteur thermique du véhicule conventionnel de référence (taux d'hybridation nul) correspond à un moteur réel dont les données sont identifiées au banc d'essai. Tous les moteurs à taux d'hybridation différents correspondent à des moteurs fictifs en appliquant les facteurs d'échelle soit de l'hypothèse 1, soit de l'hypothèse 2. Afin de tester la validité de ces deux hypothèses, deux moteurs diesels existants dont les données sont identifiées au banc d'essai et correspondants à deux puissances différentes (le moteur K9K de 54 kW et le moteur DW10 de 62 kW) sont considérés ici pour constituer des points témoins. L'idée est de considérer ces moteurs dans la procédure de dimensionnement tout en cherchant les facteurs d'échelle sur la batterie et le moteur électrique permettant d'égaliser les performances du véhicule de références. Ainsi, on obtient deux véhicules hybrides ayant le même type de batterie et dont on a calculé le taux d'hybridation a posteriori pour pouvoir les comparer aux résultats des moteurs fictifs. Les résultats de consommation de ces deux véhicules sont inclus dans la Figure 4-16 a) et b).

Nous remarquons que le moteur K9K, de technologie un peu plus récente que le DW10 est plus proche de l'hypothèse 2, alors que le moteur DW10 tend vers l'hypothèse 1 et la dépasse légèrement dans le cas du cycle autoroutier.

En ce qui concerne la contrainte 2 du cahier des charges, nous avons représenté sur la Figure 4-16 la limite du taux d'hybridation à partir de laquelle le véhicule ne satisfait plus cette contrainte. Dans ce cas précis, nous avons pris comme condition une vitesse limite minimale supérieure à 110 km/h sur une pente de 5%. Cette vitesse est assurée avec le moteur thermique uniquement (simulation réalisée avec le modèle direct de VEHLIB en inhibant la participation de la batterie).

### Interprétation

Afin de comprendre l'origine de l'optimum du taux d'hybridation constaté également dans d'autres travaux rapportés dans (Sundström et al. 2008), (Dominik Buecherl et al. 2009), nous avons examiné les différentes pertes du système véhicule. En effet le raisonnement est le suivant. Etant donné que toutes les simulations fournissent les résultats avec la contrainte  $Soc_{final}=Soc_{initial}$ , toute l'énergie consommée par le véhicule provient de l'énergie mécanique fournie par le moteur thermique. Cette énergie est dissipée dans les pertes du véhicule (forces de frottement), dans les pertes dans les différents composants de la chaîne de traction, dans les auxiliaires et dans le frein mécanique.

Les Figure 4-17 représente l'énergie mécanique fournie par le moteur thermique mise en regard des différentes pertes dans le système. Les pertes totales ne prennent pas en compte les auxiliaires (300 W en permanence) et le frein mécanique. La comparaison est faite pour l'hypothèse 1 (l'hypothèse 2 représentant le même comportement) et pour le cycle urbain entre le point de taux d'hybridation optimal (0,26) et le point du taux d'hybridation maximal (0,56).

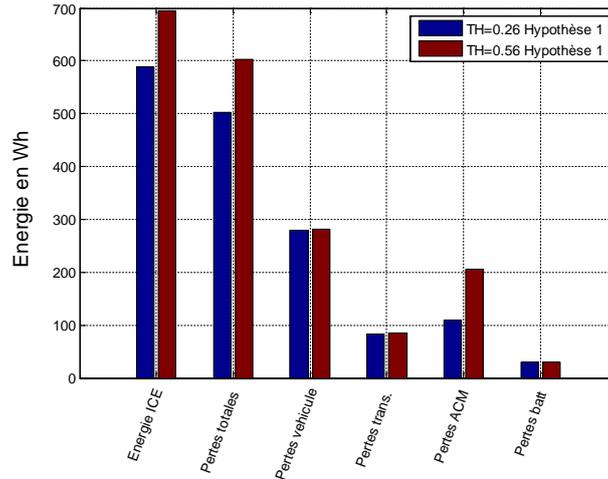


Figure 4-17 : Répartition des pertes dans les composants sur cycle urbain selon le taux d'hybridation pour l'hypothèse 1,

Il s'avère ainsi que les pertes supplémentaires dues à l'augmentation du taux d'hybridation à partir de l'optimum proviennent majoritairement de l'ACM (Association Convertisseur Machine électrique). En effet ces pertes sont deux fois plus grandes dans le cas du taux d'hybridation maximal par rapport au taux d'hybridation optimal (Figure 4-17). Afin de comprendre d'avantage l'origine de cette disparité, nous avons résumé sur le Tableau 4-6 quelques grandeurs clés.

Tableau 4-6 : Grandeurs utiles pour l'analyse des pertes

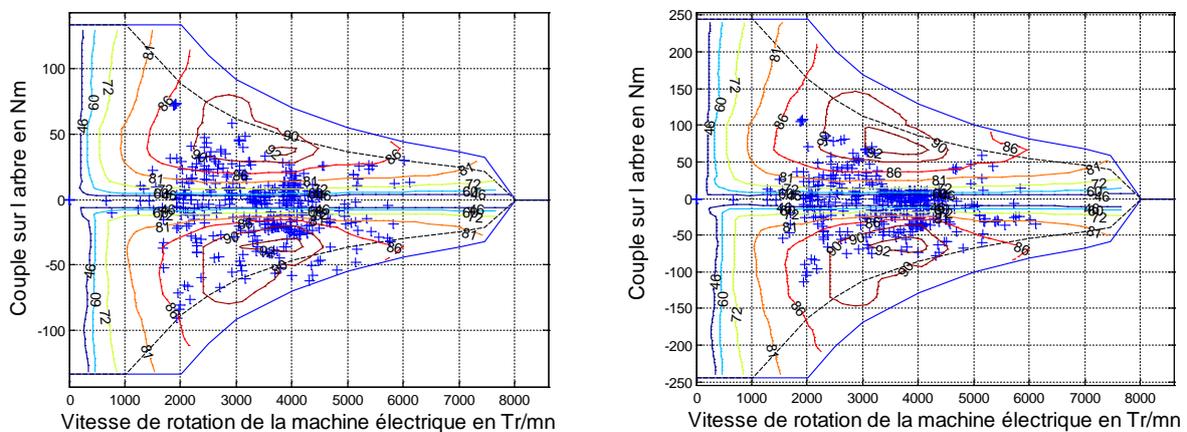
	TH=0,26	TH=0,56
Rendement Moyen ACM traction	54 %	45 %
Rendement Moyen ACM freinage	75 %	78 %
Inertie ACM	0,07 kg.m <sup>2</sup>	0.266 kg.m <sup>2</sup>
Masse ACM	44,6 kg	98 kg
Inertie moth	0,122 kg.m <sup>2</sup>	0,05 kg.m <sup>2</sup>
Masse moth	148 kg	87 kg
Masse Batt	28 kg	61,4 kg
Masse totale véhicule	1555 kg	1581 kg
Energie ACM en mode assistance électrique (boost)	15 Wh	95 Wh

A partir des résultats montrés sur le Tableau 4-6, nous avons conclu que, très probablement, 3 phénomènes se conjuguent pour contribuer à l'augmentation des pertes dans l'ACM.

- Le premier est lié au rendement moyen de l'ACM en phase motrice (voir Figure 4-18 a) et b) pour la répartition des points de fonctionnement selon les iso-valeurs de rendement). Ce rendement passe de 54 % pour le cas du taux d'hybridation optimal à 45% dans le cas du taux d'hybridation maximal. Une part de cette baisse de rendement est due à l'hypothèse de dimensionnement de l'ACM, favorable aux petites tailles. L'autre part est due directement à l'utilisation de l'ACM à relativement faible couple. Ce problème renvoie directement sur le problème du cahier des charges dynamique imposé par rapport à une utilisation urbaine dans ce cas.

- Le deuxième phénomène concerne l'augmentation considérable de l'inertie de la machine électrique (la masse totale du véhicule ne varie pas beaucoup). En effet l'hypothèse considérée (augmentation conjointe de la longueur et du diamètre de la machine) entraîne une inertie environ 4 fois plus grande pour le taux d'hybridation maximal par rapport au taux d'hybridation optimal. Cette inertie additionnelle entraîne une énergie plus grande qui transite par l'ACM à même énergie mécanique fournie pendant les phases d'accélération et de décélération en tout électrique, et de ce fait des pertes plus importantes.

- Le dernier phénomène est l'augmentation des phases d'assistance électrique (95 Wh pour le taux d'hybridation maximal au lieu de 15 Wh pour le taux d'hybridation optimal). Ceci est dû principalement à la faible taille du moteur thermique nécessitant une assistance électrique plus fréquente pour les grandes accélérations. Ce fonctionnement étant contraint, il n'est de ce fait pas forcément optimal puisqu'une recharge de la batterie est nécessaire pour équilibrer son bilan.



a) Hypothèse 1, TH optimal

b) Hypothèse 1, TH maximal

Figure 4-18 : Point de fonctionnement sur le cycle urbain dans l'espace couple vitesse de l'ACM

Bien que le poids des hypothèses dans cette démarche est encore déterminant, il n'en reste pas moins vrai que le dimensionnement de l'ACM, au niveau des rendements, revêt une importance au moins comparable aux autres composants. Dans le cas étudié, la batterie Li-ion est énergétiquement efficace, ce qui amplifie l'importance du rendement de l'ACM. Une démarche itérative, intégrant des outils de dimensionnement de machine électrique et de convertisseurs statique dans la boucle de la procédure initiée ici pourrait être une voie prometteuse. Nous en discuterons au prochain chapitre.

#### 4.4.3.2 Influence du cycle de vitesse

Nous avons vu ci-haut que les résultats de consommation et de taux d'hybridation peuvent être variables d'un usage (cycle) à un autre. Comme l'objectif de l'aide au dimensionnement est d'identifier un dimensionnement « optimal » sur l'ensemble de l'utilisation possible du véhicule, il est alors impératif dans cette démarche de réaliser les analyses sur un panorama de cycles représentatifs de l'usage réel. Pour cela, on s'appuie sur les bases de données du LTE (André 1997) à partir desquelles des analyses statistiques ont été réalisées pour déduire des cycles d'usage type.

La Figure 4-19 a) et b) présente la variabilité des résultats selon le cycle d'usage, urbain, routier ou autoroutier pour les deux hypothèses considérées.

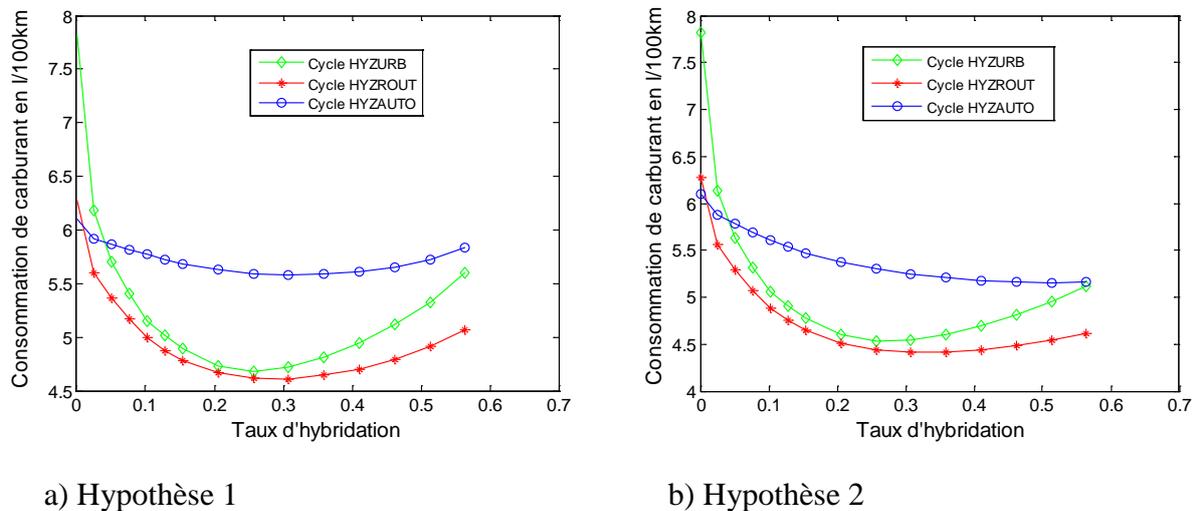


Figure 4-19 : Consommation optimale selon le taux d'hybridation et selon les cycles

Les trois cycles considérés, urbain, routier et autoroutier présentent un optimum du taux d'hybridation assez dépendant de l'hypothèse de dimensionnement. Dans le cas de l'hypothèse 1, un taux d'hybridation optimal entre 0,25 et 0,35 peut être valable pour tous les cycles. En revanche, pour l'hypothèse 2, plus le cycle est rapide, plus le taux d'hybridation optimal est grand (de 0,25 pour le cycle urbain à 0,5 pour le cycle autoroutier). Ce phénomène est directement lié au rendement du moteur thermique qui décroît au fur et à mesure que la taille du moteur thermique diminue.

## 4.5 Conclusion

Comme nous l'avons vu jusqu'ici, il existe un fort couplage entre la topologie, le dimensionnement des composants et la stratégie de gestion de l'énergie des véhicules hybrides. Une possibilité de réaliser des études paramétriques permettant une aide au dimensionnement optimal en s'affranchissant de l'influence de la gestion de l'énergie est d'utiliser des optimisations globales hors ligne. Celle basée sur la programmation dynamique a été utilisée dans la démarche explicitée ici en s'appuyant sur le modèle inverse du véhicule et ceci afin de s'affranchir des performances des boucles de régulation. La méthodologie proposée permet d'une part de satisfaire les performances dynamiques requises (vérifié à l'aide du modèle direct) et d'autre part de trouver le meilleur dimensionnement de composant, vis-à-vis d'un critère, pour une topologie de véhicule hybride donné. La variation des topologies permettrait ensuite de comparer l'efficacité de chacune dans les limites de la fiabilité des modèles et des hypothèses utilisées.

Cette méthodologie présente encore plusieurs lacunes étant donné le nombre d'hypothèses simplificatrices concernant notamment les facteurs d'échelle utilisés pour le dimensionnement. Des tentatives de couplage avec des outils de dimensionnement de machine électrique ont montré une voie possible d'amélioration. La même approche peut être également étendue au moteur thermique. Concernant la batterie, un critère important qui doit être pris en compte dans le dimensionnement concerne la durée de vie. Nous aborderons ce point un peu plus en détail dans le chapitre 5.



## ***5 Chapitre 5 : Le véhicule multi-sources. Travaux en cours et perspectives.***

### ***5.1 Introduction***

Les travaux présentés jusque là ont concerné le véhicule hybride thermique-électrique où une deuxième source réversible (batterie ou supercondensateur) est utilisée pour réaliser l'hybridation. Le concept général de l'hybridation ne se limite pas, quant à lui, à cette association, mais peut être étendu à des sources plus diversifiées. Le couplage de ces sources est certes complexe et coûteux, mais il introduit des degrés de liberté dont la gestion et l'optimisation permet de réduire d'avantage la consommation d'énergie et les émissions éventuelle de polluants.

La topologie, la gestion de l'énergie et le dimensionnement des composants d'un véhicule multi-sources est au cœur des recherches actuelles et futures. Le couplage mis en évidence entre ces trois dimensions pour le véhicule hybride thermique électrique reste entièrement valable pour le véhicule multi-sources. La complexité de ce type de véhicule requière l'extension des méthodes développées pour le véhicule hybride thermique-électrique ou la recherche de nouvelles méthodes plus génériques. Dans ce chapitre nous allons tenter d'explorer les perspectives dans les différentes dimensions à considérer pour l'optimisation énergétique de véhicule multi-sources. Certaines méthodes présentées au cours de ce travail, notamment dans la partie gestion de l'énergie, seront proposées pour une extension au véhicule multi-source. D'autres concepts proposés dans la littérature ou donnés comme pistes de recherches possibles sont discutés.

### ***5.2 Perspective sur les Topologies***

#### ***5.2.1 Vers des systèmes multi-sources***

Nous appelons véhicule multi-sources tout véhicule disposant de plusieurs sources d'énergie à bord. Il inclut de ce fait toute forme de véhicules thermique, électriques à batterie ou à Pile à Combustible, hybrides et mixtes, sans émettre a priori de restriction.

Le véhicule multi-sources aura un élément invariable représenté par la caisse du véhicule (Châssis, roues, habitacle ...) comme sous système mécanique en mouvement (Figure 5-1). Les sources peuvent être réversibles (bidirectionnelles) ou non réversibles (unidirectionnelle), réceptrices et/ou génératrice d'énergie. Les éléments constituant la motorisation et les accessoires peuvent être soit des transformateurs d'énergie soit des sources réceptrices (consommateurs).

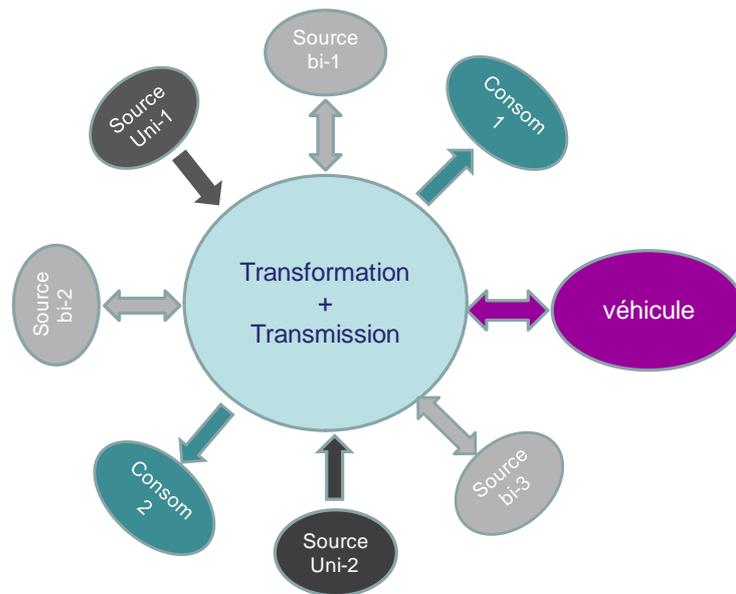


Figure 5-1 : Schéma d'un véhicule multi-sources

Les sources génératrices non réversibles permettent d'embarquer de l'énergie qui sera consommée pendant l'utilisation du véhicule sans possibilité que ces sources puissent se recharger autrement que par l'extérieur. Nous pouvons citer comme sources d'énergie non réversibles les carburants fossiles, les Bio-carburants, les carburants de synthèse ou l'hydrogène.

Les sources réversibles, permettent de fournir ou de recevoir et d'accumuler de l'énergie au cours du fonctionnement du véhicule. Elles peuvent être de nature électrochimique (batteries), mécanique (volant d'inertie), électrostatique (supercondensateur), oléopneumatique (réservoir de gaz comprimé), électromagnétique (bobine supraconductrice) ...

Les transformateurs permettent de transformer l'énergie pour assurer les différents transferts d'énergie entre les sources ou entre les sources et le véhicule. Les transformateurs les plus connus aujourd'hui sont les moteurs thermiques, les moteurs électriques, les piles à combustible et les moteurs hydrauliques.

Les consommateurs représentent les accessoires électriques alimentés par le réseau de bord de basse tension (Feux de signalisation, équipement électrique et électronique, climatisation, etc.), les accessoires mécaniques directement en prise directe sur les transformateurs, les accessoires hydrauliques (vérins d'actionneurs notamment sur les véhicules Lourds ou de transport en commun).

### 5.2.2 Vers des éléments de stockage mixtes

Les sources d'énergie dans un véhicule multi-sources peuvent être de natures différentes ou certaines de même nature. Il est alors possible d'associer les sources dont les énergies en sorties sont de même nature pour réaliser des sources équivalentes. C'est le cas par exemple de l'association des deux sources batterie et supercondensateur qui fournissent toute les deux de l'énergie électrique. Nous appellerons une telle association source "mixte" (Anne Laure Allègre 2010).

Nous nous sommes tout d'abord focalisé sur le cas d'étude simple Bat/Scap comme première étape d'étude de sources mixtes.

Les supercondensateurs disposent d'une grande puissance massique mais d'une faible énergie massique comparée à celle des batteries. Inversement les batteries typées énergie présentent une puissance massique relativement faible. Afin de réaliser une source d'énergie plus performante sur les deux aspects, une association des deux sources a été envisagée. L'adjonction de supercondensateur à la batterie permet également de diminuer sa sollicitation et de fait d'allonger, en théorie, sa durée de vie.

L'association des deux sources peut se faire en utilisant différentes configurations de convertisseurs associés. Des travaux de thèse co-encadrée avec le L2EP de Lille 1, réalisés dans le cadre du réseau MEGEVH, ont permis d'utiliser la REM dans le but de développer des modèles, puis la commande, de cette association (Anne Laure Allègre 2010). Ces modèles ont permis d'étudier différentes topologies et différentes lois de gestion de l'énergie.

Deux principales topologies ont été retenues (Figure 5-2 et Figure 5-3), modélisées puis validés expérimentalement. La première a été validée sur le prototype du Microbus du LTE présenté dans l'annexe 6, l'autre sur un banc d'essai du L2EP de Lille en configuration HIL.

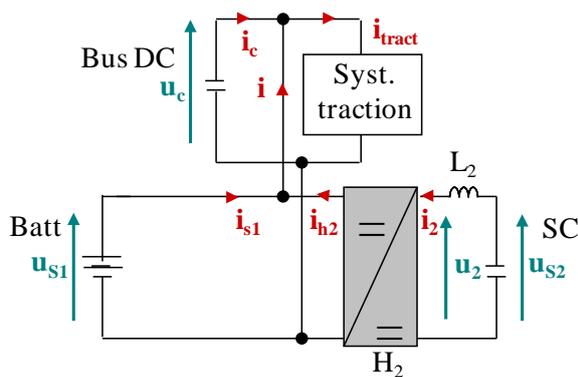


Figure 5-2 : Configuration d'association utilisant 1 convertisseur

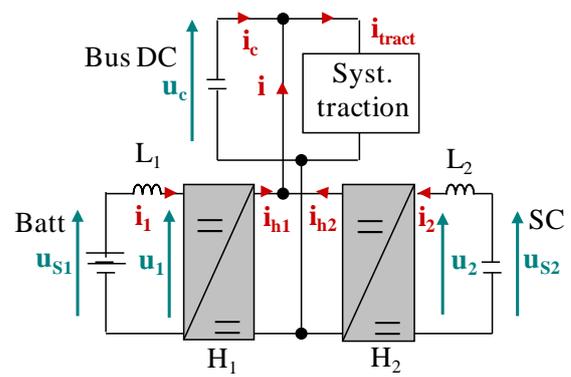


Figure 5-3 : Configuration d'association utilisant 2 convertisseurs

La Représentation Energétique Macroscopique (REM) a permis de synthétiser la commande des deux systèmes en utilisant les règles d'inversion de modèles comme le montre la Figure 5-4 pour le cas du système à 2 convertisseurs.

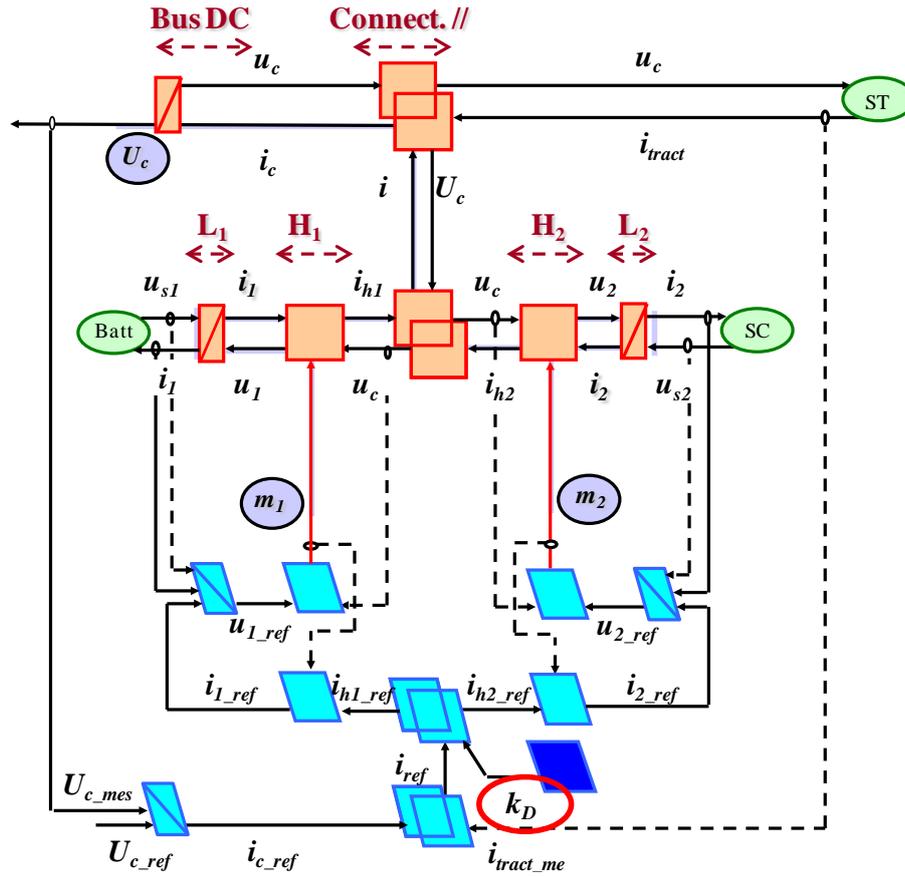


Figure 5-4 : REM et structure de contrôle par inversion de la configuration à deux convertisseurs

Le premier objectif de la commande mise en œuvre a été le contrôle de la tension du bus continu  $U_c$ . Pour cela, un correcteur permet de générer la référence du courant du bus continu. Ce courant, retranché du courant de traction mesuré donne la référence du courant global fournie par les deux sources au niveau du bus continu. Ce courant étant la somme des courants avals des convertisseurs, il existe de ce fait un degré de liberté nécessitant une stratégie de partage des courants permettant de fixer le coefficient  $K_D$  défini par :

$$\begin{cases} i_{h1\_ref} = K_D i_{ref} \\ i_{h2\_ref} = (1 - K_D) i_{ref} \end{cases} \quad (5-1)$$

Quatre stratégies de partage ont été simulées puis testées :

1) Stratégie de filtrage : elle utilise une approche fréquentielle pour séparer les sollicitations haute fréquence qui seront demandées au super-condensateur et basse fréquence demandées à la batterie. Cette approche a été proposée par Chapoulié (Chapoulié 1999) puis utilisée par Akli notamment pour le dimensionnement du stockage mixte pour une locomotive hybride (Akli et al. 2007).

2) Stratégie avec saturation variable du courant : cette stratégie permet de réduire les sollicitations de la batterie en lui imposant un écrêtage à niveau variable du courant demandé. Les pics de courant au dessus de cette valeur sont demandés aux supercondensateurs. (A. L. Allègre et al. 2009)

3) Stratégie fonction de l'accélération : cette stratégie décompose la puissance demandée par le véhicule en une puissance d'accélération et une puissance résistante (due aux forces résistantes). Dans cette stratégie on demande la puissance d'accélération aux supercondensateurs et la puissance résistante à la batterie. Ceci réalise finalement un filtrage implicite de la puissance.

4) Stratégie de minimisation des pertes instantanées : Pour cette stratégie, le coefficient de distribution  $K_D$  est calculé de façon à minimiser à chaque instant les pertes globales dans les batteries et les supercondensateurs, calculées en fonction des résistances internes et des courants.

Globalement, les quatre stratégies ont permis de réaliser le partage instantané des courants mais, dans tous les cas, avec une dérive de l'état de charge des supercondensateur. Une amélioration de ces stratégies a alors consisté en un rajout de phases de recharge des supercondensateurs notamment à l'arrêt du véhicule.

Plus de détails sur ces résultats sont donnés dans l'annexe 8 pour le cas de l'expérimentation du Microbus hybride mixte.

Des travaux dans l'équipe ont proposé également une méthode basée sur la stratégie du  $\lambda$ \_contrôle qui utilise la commande optimale (E. Vinot et al. 2010). Le principe est de minimiser à chaque instant un Hamiltonien du type :

$$H(t) = I_{batt}^2(t) + \lambda(t) \cdot \dot{E}_{SC}(t) \quad (5-2)$$

où  $E_{SC}$  est l'énergie contenue à l'instant  $t$  dans les supercondensateurs.

Les résultats de cette stratégie montrent des gains énergétiques par rapport aux stratégies précédemment citées. En revanche, l'optimalité énergétique est perdue dès qu'il y a saturation de la variable d'état du système. Ce cas apparaît d'autant plus fréquemment que les supercondensateurs sont sous dimensionnés par rapport aux batteries. D'autres travaux utilisent la programmation dynamique stochastique pour réaliser le partage de courant entre les deux sources en minimisant les pertes (Christoph Romaus et al. 2010).

### **5.2.3 Vers des sources multiples**

Comme nous l'avons évoqué au début de ce chapitre, le véhicule multi-sources tend à diversifier le type d'énergie embarquée à bord. Plusieurs études relevant de véhicules avec pile à combustible rapportent des réalisations d'hybridation de la pile avec des batteries (Jeuvey et al. 2009), (C.-Y. Li & Liu 2009) ou des supercondensateurs (Azib et al. 2010). Des travaux sur des topologies plus complexes ont démontré la faisabilité d'association de plusieurs types de sources.

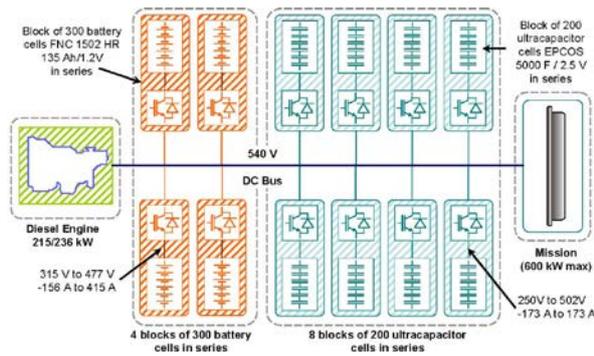


Figure 5-5 : Topologie de la locomotive hybride Plathee

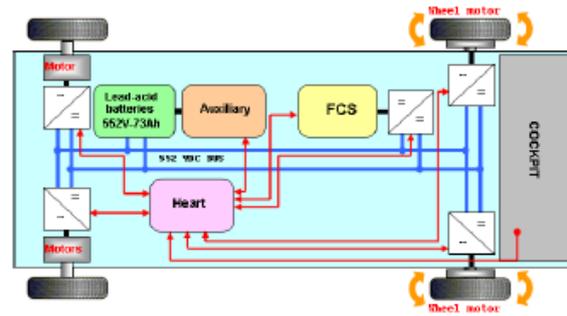


Figure 5-6 : Topologie du véhicule plateforme ECEE

Les travaux rapportés dans (Jaafar et al. 2009) (Figure 5-5) par exemple ont concerné une locomotive hybride disposant des sources suivantes :

- un groupe électrogène à base de moteur diesel,
- des batteries,
- des supercondensateurs,
- un volant d'inertie.

D'autres travaux ont utilisé un véhicule militaire comme plateforme d'essai pour tester la configuration présentée sur la Figure 5-6 (Jeuvey et al. 2009). Le véhicule, disposant de moteurs électriques dans les roues à l'avant et proches des roues sur l'essieu arrière, est alimenté par un bus continu connectant des batteries au plomb et une pile à combustible.

Aussi bien dans le cas de la locomotive que dans le cas du véhicule militaire, la connexion des sources est réalisée à travers le bus continu électrique. Le véhicule dispose alors d'une chaîne de traction électrique pour réaliser l'hybridation de type série.

Bien que ces travaux décrits ci-haut ont réalisé des avancées indiscutables, notamment sur les aspects couplage des systèmes électriques, la gestion globale de l'énergie et le dimensionnement de ces topologies multi-sources restent des problématiques ouvertes. Nous reviendrons sur l'aspect gestion de l'énergie dans le § 5.3.1.

Dans cette thématique de sources multiples, le co-encadrement d'un post-doctorat dans le cadre du projet MEGEVH-multistock, entre le L2EP de Lille, le LTE de l'IFSTTAR, l'EPF de Lausanne et l'Université Carlos III de Madrid est en cours et va permettre d'étendre les résultats obtenus sur les topologies d'association batterie/supercondensateurs en utilisant la REM.

#### 5.2.4 Vers des transmissions plus complexes mais plus intégrées

Nous avons vu au premier chapitre les possibilités offertes par l'hybridation en termes d'association des éléments de motorisation et de transmission. Certains agencements sont assez simples comme l'hybride série qui s'appuie sur une structure de base toute électrique. L'hybride parallèle est déjà plus complexe car nécessite un couplage mécanique entre le moteur thermique et la machine électrique, tout en assurant la possibilité d'arrêter le moteur thermique pendant les modes électriques. Le véhicule hybride série-parallèle augmente la complexité de l'architecture mais permet dans certain cas une transmission mécanique plus compacte.

Nous avons vu également que dans le cas des véhicules thermiques conventionnels, hybrides parallèles et hybrides série- parallèle, la transmission de l'énergie mécanique du moteur thermique vers les roues est assurée tout en adaptant constamment la vitesse du véhicule à la vitesse du moteur thermique. Dans le cas des boîtes de vitesse discrètes cette fonction est réalisée par une intervention du conducteur pour les boîtes manuelles et d'une manière programmée pour les boîtes robotisées et automatiques. En revanche les plages de fonctionnement du moteur restent contraintes par le nombre limité de rapports possibles et leurs longueurs. Une Transmission Continuum Variable (CVT) permettrait de découpler les vitesses du véhicule et du moteur en permettant le choix du point de fonctionnement dans l'espace couple vitesse. Des versions entièrement mécaniques utilisant des poulies à diamètres variables et une courroie (généralement métallique) sont possibles et ont été utilisées dans certains véhicules hybrides (Insight de Honda Japon version 1, Nissan Tino hybride). Seulement ce type de CVT présente généralement un rendement inférieur au rendement des boîtes discrètes à base d'engrenage. En effet, en plus des différentes pertes mécaniques de la CVT, un actionneur est requis pour la variation du diamètre des poulies et présente souvent des consommations non négligeables.

Le système THS de Toyota dans le véhicule hybride série-parallèle utilise un train épicycloïdal pour assurer à la fois le couplage mécanique du moteur thermique et des machines électriques, et la fonction de variation de vitesse du moteur thermique. Appelée EVT (Electric variable Transmission) par certains auteurs (Keyu Chen 2010), on peut qualifier cette transmission plutôt de CVT car la variation de vitesse est réalisée mécaniquement. La deuxième machine électrique a le même rôle ici que l'actionneur qui permet la variation des diamètres de la poulie dans la CVT classique.

Une véritable EVT serait celle décrite par (Hoeijmakers & Ferreira 2006b) et où la variation de vitesse est assurée par la différence de rotation de deux éléments d'un moteur électrique appelé de ce fait moteur à double rotor. Un des rotors est couplé au moteur thermique, le deuxième directement au différentiel ou à travers un deuxième moteur électrique dans le cas d'une configuration hybride à l'image de celle présentée sur la figure 1-28.

Dans le cadre du réseau MEGEVH, un projet (MEGEVH-EVT) dédié à une transmission de ce type est en cours et va permettre d'évaluer les potentiels d'une EVT constituée de deux moteurs imbriqués de type synchrones à aimants permanents. La structure retenue est celle constituée d'un rotor intérieur à bobinage triphasé, un rotor extérieur comportant des aimants permanents sur les deux faces et un stator à bobinage triphasé (Figure 5-7 et Figure 5-8). Cette structure ainsi que d'autres ont été proposées dans plusieurs publications sans beaucoup d'éléments sur leur comportement et leurs performances (Aubertin et al. 2008), (Ping Zheng et al. 2007), (Xu & Y. Zhang 2006). Le projet MEGEVH-EVT réunit trois laboratoires Français : le L2EP de Lille, Femto-ST de l'université de Franche comté et le LTE de l'IFSTTAR en collaboration avec l'Institut Technologique de Harbin en Chine. L'objectif de ce projet est d'évaluer ce concept d'EVT compacte synchrone par rapport à une CVT à base de train épicycloïdal. L'évaluation consistera en une intégration du modèle de la nouvelle structure dans un modèle validé du véhicule hybride Prius de Toyota puis une comparaison entre le nouveau modèle et le modèle d'origine en terme de flux d'énergie et d'efficacité énergétique.

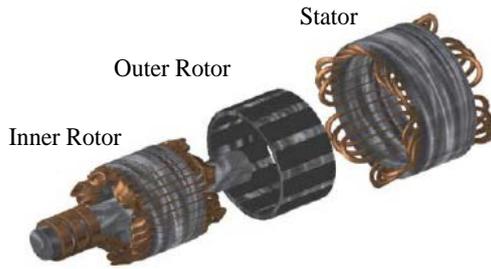


Figure 5-7 : Différentes parties de l'EVT considérée

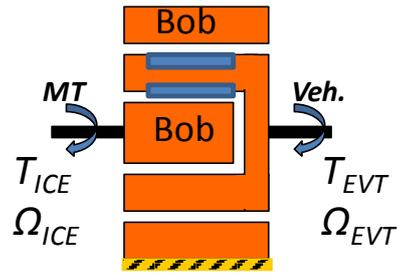


Figure 5-8 : Schéma de l'EVT et connexion mécanique

La conception et le contrôle de l'EVT représente un challenge de taille vue la complexité électromagnétique de l'ensemble. Aujourd'hui, les travaux sont au stade de la simulation. Après le choix de la structure (Figure 5-8) un cahier des charges provenant de simulations utilisant le modèle validé de la Prius II sous VEHLIB a permis de déduire les espaces couple vitesse des deux machines imbriquées. Ces espaces ont été pris comme cahier des charges pour le dimensionnement des deux machines utilisant une approche couplée analytique et utilisant les éléments finis (Y. Cheng et al. 2010), (Y. Cheng et al. 2011).

Un modèle de l'EVT utilisant la REM a permis de déduire la structure de commande appropriée. Cette commande fonctionne aujourd'hui avec des hypothèses simplificatrices qui négligent le couplage magnétique entre les deux machines.

La structure de l'EVT étudiée permettrait de remplacer le train épicycloïdal et les deux machines électrique du système par une seule structure compacte. En revanche, plusieurs verrous restent à lever et dont nous pouvons citer principalement les suivants :

- l'alimentation des bobinages du rotor intérieur impose l'utilisation d'un dispositif avec bagues et balais qui introduit des pertes supplémentaires et nécessite un entretien au cours de son utilisation,
- Les pertes dans ces machines sont encore mal connues et le refroidissement pourrait être une problématique dans le cas de dimensionnement contraignant qui viserait à améliorer la puissance massique et volumique,
- l'hypothèse de découplage magnétique doit être vérifiée. Dans le cas de l'existence d'un couplage fort, la commande des deux machines risque d'être difficile à réaliser pour atteindre les différentes performances et modes de fonctionnement souhaités.

### 5.2.5 Bilan

La croissance de la complexité des topologies des véhicules futures pourra provenir de deux composantes.

La première est la multiplicité des sources. Dans ce cadre, les recherches sont engagées pour l'étude des différentes possibilités de couplage de ces sources. La tendance étant quand même assez marquée pour une architecture électrique de couplage basée sur un bus continu commun. Les sources connectées sont de ce fait soit de nature électrique soit associées à des transformateurs pour le devenir (comme le groupe électrogène). Rappelons que ce cas de figure ne concerne que les véhicules multi-sources de type série. Reste à étudier également le

cas où toutes ou une partie des connexions se font mécaniquement (hybride parallèle ou mixte).

La deuxième concerne la complexification des transformateurs d'énergie. Dans un véhicule hybride série-parallèle, la transmission de l'énergie des sources vers le véhicule et inversement pourra se réaliser d'une manière très compacte et sans contact en utilisant une transmission électrique variable (EVT) par exemple. Seulement il reste encore différents problèmes à résoudre pour pouvoir concevoir et commander correctement ce type de machine.

Pour les deux aspects, la REM a été clairement identifiée comme outil privilégié pour l'étude des associations complexes de sources comme pour la modélisation et surtout la commande de transformateurs complexes comme l'EVT par exemple. Le projet MEGEVH-multistock et MEGEVH-EVT vont dans ce sens.

## ***5.3 Perspectives pour la gestion de l'énergie***

### ***5.3.1 Vers une gestion de l'énergie multi-sources***

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, deux approches sont possibles pour synthétiser une loi de gestion de l'énergie dans un véhicule hybride. Une approche heuristique qui s'appuie sur la détermination de règles expertes. La mise en œuvre de ces règles pourrait s'appuyer sur une démarche déterministe de type machine d'état ou sur une démarche à base de logique floue. L'autre approche, s'appuyant sur les théories d'optimisation, permet de réaliser des gestions en temps réel, sous optimales de part la non connaissance a priori du profil de vitesse, mais qui ne nécessitent pas de réglage particulier.

Dès que le système se complexifie, que ce soit par l'addition de sources ou par la complexification de la transmission, le nombre de cas possibles pour les chemins des flux d'énergie augmente et l'établissement de règles pour la gestion de l'énergie devient critique. Il est de ce fait nécessaire d'imaginer pour un système multi-sources des méthodes génériques et systématiques.

Dans le cas de sources multiples, la méthode la plus utilisée est celle basée sur l'approche fréquentielle qui propose de découpler les différentes dynamiques des sources. Cette approche a été utilisée pour le cas de la locomotive diesel décrite au § 5.2.3 (Jaafar et al. 2009) ainsi que dans d'autres travaux traitant de la gestion de l'énergie dans un véhicule multi-source : pile à combustible, batterie et supercondensateurs (X. Zhang et al. 2008), (Erdinc et al. 2009). Dans ce dernier cas, trois catégories de filtre sont appliqués au courant demandé afin d'extraire les dynamiques les plus lentes pour la pile à combustible, les dynamiques moyennes pour les batteries et les plus rapides pour commander le courant dans les supercondensateurs.

Afin de développer d'autres méthodes et les optimiser, la Représentation Energétique Macroscopique (REM) semble être un bon outil. En effet à partir d'un système complexe multi-sources une commande par inversion peut être systématiquement synthétisée (W. Lhomme et al. 2011), (A. L. Allègre et al. 2009). Cette commande reste en revanche à un niveau local et les différents degrés de libertés mis en évidence restent à fixer par des stratégies de la commande globale. Mais cette structuration a l'avantage de bien mettre en évidence les articulations entre commandes locales et gestion globale, et, de ce fait, impacte positivement le développement de la supervision (définition de sorties). Dans le cadre du

réseau thématique MEGEVH, un projet ANR a été déposé et a comme objectif d'étudier l'articulation entre les différents niveaux de commande afin de rendre générique et systématique la commande des véhicules multi-sources (projet MEGEVH-strategy). Ce projet associe plusieurs laboratoires et industriels et va permettre d'appliquer les développements génériques structurés par la REM à différents cas d'application de véhicules hybrides (voir Figure 5-9).

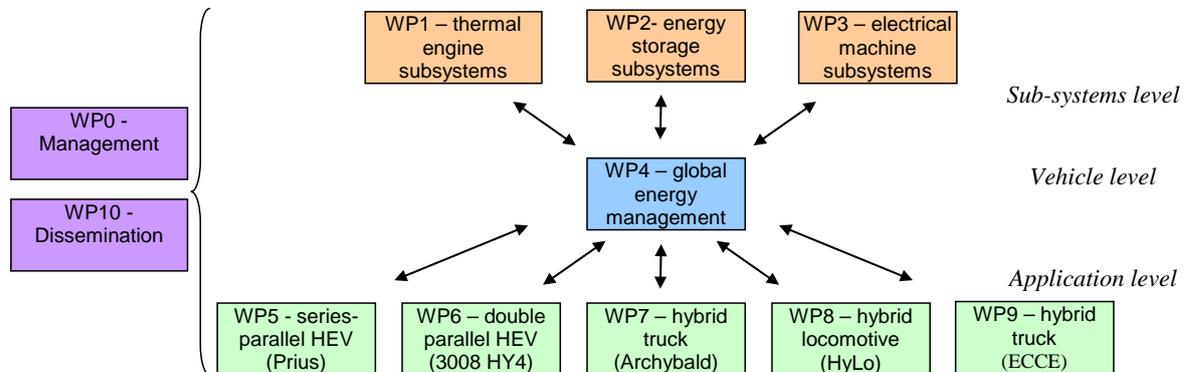


Figure 5-9 : Organisation du projet MEGEVH-strategy

En ce qui concerne l'optimisation globale ou encore la gestion de l'énergie optimale, la question de la généralisation des méthodes est à l'ordre du jour indépendamment de leurs structurations avec la REM. L'extension de la programmation dynamique par exemple peut difficilement dépasser les trois dimensions (l'état de 2 sources et le temps) à l'heure actuelle étant donné les ramifications du graphe nécessaire et les capacités de calcul qui en découlent. Ce qui implique que, pour le véhicule hybride mixte par exemple, il est encore possible de développer des graphes à trois dimensions (temps, état de charge batterie, tension des supercondensateurs). Ce type de travaux est actuellement en cours dans l'équipe. La méthode de la commande optimale utilisant le principe du minimum de Pontryaguine est en revanche beaucoup plus souple en termes d'adaptation. En effet, pour le cas d'un véhicule hybride mixte (batterie et supercondensateurs) de type parallèle, cette méthode a été adaptée en utilisant le principe du minimum de Pontryaguine. Le hamiltonien à minimiser à chaque instant s'écrit :

$$H(t) = \dot{m}(t) + \lambda_{batt}(t) \cdot P_{batt}(t) + \lambda_{SC}(t) \cdot P_{SC}(t) \quad (5-3)$$

La commande optimale consiste alors à déterminer pour chaque cycle d'usage les paramètres de Lagrange qui permettent de maintenir l'état de charge des supercondensateurs et de contrôler l'état de charge de la batterie. Hors ligne ces paramètres peuvent être déterminés d'une manière itérative (par dichotomie par exemple). En ligne, il est impératif d'avoir une estimation ou une boucle fermée à l'image de ce qui a été présenté dans le chapitre 3. L'inconvénient de cette méthode est la perte d'optimalité dès qu'il y a saturation des variables d'état. Pour le cas des supercondensateurs, certains dimensionnements peuvent être critiques vis à vis de cette méthode mais les résultats restent cohérents (E. Vinot et al. 2010).

Plus généralement, et sous réserve de non saturation des états des sources, nous pouvons imaginer d'appliquer cette méthode en généralisant la formulation du Hamiltonien comme suit :

$$H(t) = \dot{m}(t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \cdot P_i(t) \quad (5-4)$$

Où  $\dot{m}(t)$  est le débit de carburant ou d'hydrogène de la source non réversible, n est le nombre de sources réversibles additionnelles,  $\lambda_i(t)$  est le facteur de Lagrange pour la source i et  $P_i(t)$  est la puissance instantanée de la source i.

### 5.3.2 Vers une optimisation multi-objectifs

La plus part des travaux sur l'optimisation de la gestion de l'énergie, y compris les nôtres, ont utilisé un critère simple concernant la consommation de carburant, ou composé en essayant d'introduire avec des facteurs de pondération les émissions de polluants (Lescot et al. 2010), (B. Zhang et al. 2009).

La focalisation plus spécifique sur la consommation de carburant, synonyme d'émission de CO<sub>2</sub>, a été dictée par les priorités des enjeux climatiques (effet de serre) et économiques (prix du pétrole), et par le fait que les émissions de polluant locaux ont été drastiquement réduites suite aux normes de plus en plus sévères.

En revanche, il apparait d'après les différentes études d'hybridation que :

- le minimum de consommation de carburant d'un véhicule hybride présente souvent une zone suffisamment plate de façon à ce qu'on puisse introduire certaines contraintes sans perte importante d'optimalité,
- certaines lois de gestion de l'énergie optimale vis-à-vis de la consommation de carburant avaient tendance à solliciter d'une manière importante la batterie.

Etant donné la sensibilité de la durée de vie des batteries à la sollicitation en profondeur de décharge, en amplitude de courant et en température de fonctionnement, il est important d'en tenir compte dans le critère d'optimisation.

Il est de ce fait possible d'avoir plusieurs objectifs dans l'optimisation de la gestion de l'énergie dont l'un permet de réduire les sollicitations de la batterie. Comme exemple, reprenons le cas du véhicule hybride parallèle diesel du chapitre 4. La gestion de l'énergie utilisée pour étudier la sensibilité de la consommation de carburant au dimensionnement est la programmation dynamique dont la fonction coût était la consommation de carburant en minimisant le critère :

$$J = \sum_{i=1}^N \dot{m}(i) T_e \quad (5-5)$$

Si nous considérons une fonction coût qui intègre la sollicitation des batteries, on peut choisir le courant efficace comme variable pertinente conduisant au critère :

$$J = \sum_{i=1}^N \dot{m}(i) T_e + \beta I_{bat\_eff} T_e \quad (5-6)$$

En faisant varier le coefficient nous aurons une consommation de carburant optimale correspondant à différentes valeurs du courant efficace de la batterie comme représentée sur la Figure 5-10.

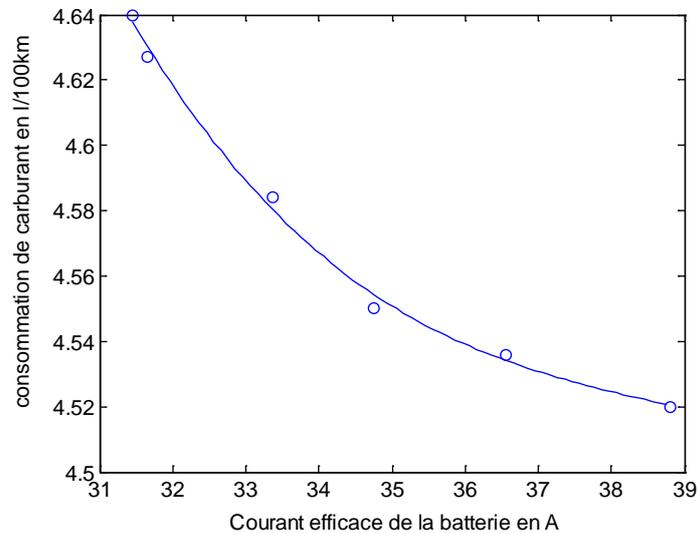


Figure 5-10 : Consommation de carburant fonction du courant efficace de la batterie

Cette courbe, connue aussi sous le nom de front de Pareto, exprime le fait qu'une amélioration dans la direction d'un objectif ne peut se faire qu'en dégradant la qualité du deuxième. En revanche, un compromis peut être réalisé selon l'importance que présente chacun des objectifs.

Ce principe peut être étendu à d'autre dimension comme la prise en compte des émissions de polluants, en particulier les  $\text{NO}_x$  dans les hybrides diesel par exemple. Des méthodes avancées comme les algorithmes génétiques sont souvent utilisées pour trouver les meilleurs compromis dans les différentes directions (Elaoud et al. 2007), (B. Zhang et al. 2009).

Dans le cas d'un véhicule multi-sources, cette approche reste valable en hiérarchisant les objectifs selon la consommation et les émissions des sources non réversibles et la disponibilité et la durabilité des sources réversibles.

### 5.3.3 Vers des critères plus globaux

Pour comparer l'efficacité des véhicules nous utilisons le plus souvent des simulations ou des essais sur des profils de vitesse (cycle) normalisés ou issus d'usage réel (Hyzem, Artemis, ..). Ces comparaisons permettent de situer les différentes solutions en termes de consommation d'énergie et éventuellement d'émission de polluants pendant la phase de leur utilisation (Van Mierlo, G Maggetto, et al. 2004), (R. Trigui et al. 2003). Pour une comparaison plus exhaustive, qui tient compte d'autres externalités, des démarches appelées Analyse de Cycle de Vie (ACV) ont été mises en place. Les critères étudiés concernent le plus souvent l'utilisation des matériaux et des carburants, la pollution atmosphérique et la recyclabilité des véhicules en fin de vie. Elles comprennent généralement trois phases :

- du puits au réservoir : cette phase concerne l'évaluation de la production de l'énergie nécessaire pour le véhicule. Elle comprend les procédés d'extraction, de raffinage, de

transport et de distribution pour les carburants ou la génération et la distribution de l'énergie électrique pour les véhicules électriques et hybrides rechargeables.

- du réservoir à la roue : appelé également la phase d'utilisation du véhicule, elle correspond à l'évaluation des consommations d'énergie et des rejets éventuels de polluants pendant la vie du véhicule.

- du berceau à la tombe : il s'agit dans ce volet d'étudier le coût, selon les différents critères cités ci dessus, de l'extraction et l'utilisation des matériaux nécessaires, les procédés de fabrication des véhicules et à la fin leur procédé de destruction et de recyclage de certains matériaux.

Ce découpage peut être différent, certaines études se limitent aux deux premières phases en parlant d'évaluation du puits à la roue (« Well To wheel »). D'autres réalisent un découpage comprenant les différentes étapes de la vie d'un véhicule : i) recherche et développement pour la conception, ii) Extraction des matériaux, iii) fabrication, iv) utilisation, v) fin de vie (MacLean & Lave 2003). Certains travaux se limitent à un ou deux aspects comme l'énergie et le CO2 mais utilisent la démarche de l'analyse de cycle de vie pour intégrer toute la chaîne, de la production au recyclage (Samaras & Meisterling 2008), (Yoshida et al. 2003).

Ces approches d'analyse de cycle de vie sont encore en phase de recherche. En effet d'une part les données qui concernent les technologies les plus récentes sont difficiles à obtenir. D'autre part les méthodologies de prise en compte des différents aspects et de leurs poids respectifs dans le résultat global est encore sujet à controverses. Certaines études proposent de parler plutôt de coût sociétal de cycle de vie en ramenant toutes les externalités à des coûts économiques (exprimé en \$) (Ogden et al. 2004).

Etant donné l'importance de la phase d'utilisation dans le bilan d'énergie et de CO2 des véhicules hybrides (Messagie et al. 2010), (MacLean & Lave 2003), (Samaras & Meisterling 2008), il peut être admis à moyen terme de limiter les critères d'optimisation des véhicules à un compromis énergie/pollution/durée de vie des composants. Il serait en revanche nécessaire à plus long terme d'intégrer un critère global s'appuyant sur l'ACV pour l'optimisation de la gestion de l'énergie et le dimensionnement des composants du véhicule multi-source.

#### **5.3.4 Bilan**

Une des problématiques soulevée par la multiplicité des sources et par la complexité des transmissions est la gestion globale de l'énergie dans le véhicule. Cette gestion peut rester à un niveau heuristique comme on voit aujourd'hui dans certains travaux. Mais un des objectifs de l'addition de source et de la complexification des transmissions est d'optimiser le fonctionnement du véhicule. Pour cela l'extension de certaines techniques d'optimisation de la gestion de l'énergie dans le véhicule hybride thermique-électrique peut être envisagée. Or cette extension ne sera efficace que si la commande au niveau local est bien structurée. L'utilisation de la REM permettra ici de réaliser les commandes systématiques par inversion puis la liaison entre les différents niveaux de commande. Le projet MEGEVH-Strategy sera une plateforme intéressante pour la conception puis la validation d'une démarche générique aboutissant à une gestion structurée et optimale.

La gestion optimale sous entend l'existence d'un critère à optimiser. Ce dernier doit être multi-objectif afin de trouver des compromis entre les différentes dimensions à optimiser.

Une dimension particulière à prendre en compte est la sollicitation de la batterie pour augmenter sa durée de vie. Un critère plus général s'appuyant sur une analyse de cycle de vie (ACV) est certainement plus pertinent mais les recherches dans ce domaine sont en plein essor et les données et les hypothèses sont encore assez disparates.

## ***5.4 Perspectives pour le dimensionnement***

### ***5.4.1 Vers un dimensionnement adapté à la mission***

Que ce soit électrique, hybride ou à Pile à combustible, un véhicule a une finalité correspondant à la mission qui lui est conférée. Jusque là, comme il a été mentionné dans le chapitre 4, le dimensionnement des véhicules du point de vue dynamique s'appuyait sur des performances globalement peu utilisées. L'accélération maximale ou la vitesse maximale en régime permanent en pente sont deux cas d'usage très spécifiques et nombre d'utilisateurs n'ont jamais recouru à ces performances. Les circuits urbains par exemple n'utilisent qu'une puissance très partielle par rapport à celle installée dans le véhicule. Or nous avons vu au chapitre 4 que le dimensionnement de la motorisation en puissance est fortement dépendante des performances dynamiques exigées.

Certains auteurs proposent des dimensionnements adaptés à l'usage (Pertusa 1996), (Jaafar et al. 2010). L'idée est de partir des bases de données d'enregistrement de mission des véhicules pour aboutir au cahier des charges des performances dynamiques.

Cette approche nous semble bonne et nous l'avons appliquée dans un outil de dimensionnement de moteur électrique (Legranger et al. 2006) ainsi que pour le dimensionnement d'une transmission tout électrique (EVT) pour un véhicule hybride série-parallèle (Y. Cheng et al. 2011).

Cette approche permet de se rapprocher des vraies performances attendues du véhicule mais présente encore deux inconvénients.

- Mis à part le cas d'une disponibilité d'enregistrements spécifiques à l'application (e.g. locomotive (Jaafar et al. 2010), Microbus (M. Boujelben et al. 2006) les enregistrements de vitesse en fonction du temps qui constituent les bases de données sont réalisés avec des véhicules de différentes puissances et avec des conducteurs de comportements divers. Ainsi il n'est pas exclu d'avoir des points dans les espaces d'utilisation qui requièrent des performances surdimensionnées ou sous-dimensionnées pour une gamme donnée de véhicule.

- L'échantillonnage des points d'utilisation devrait prendre en compte aussi le temps passé, successif ou espacé, des différentes puissances mises en jeux. En effet, afin de pouvoir sous dimensionner les moteurs avec une suralimentation transitoire, il est impératif de connaître la durée de la suralimentation afin de ne pas générer des modes dégradés fréquents.

Pour ce dernier point, des statistiques qui prennent en compte la durée des sollicitations sont nécessaires. Il est également possible d'utiliser des modèles thermiques fictifs des machines ou de la batterie et qui ont pour objectif d'intégrer les sollicitations en puissance durant tout le cycle.

## **5.4.2 Vers le couplage de modèle pour l'aide au dimensionnement**

Nous avons vu au chapitre 4 que l'organisation proposée pour une aide au dimensionnement des véhicules hybrides permet de dégager des tendances assez claires quant au taux d'hybridation optimal. En revanche elle souffre encore d'un nombre important d'hypothèses liées aux manques de données ou d'expertise sur certains composants du système. Les outils développés dans l'équipe ont permis de capitaliser des modèles et des données qui seront utiles dans l'amélioration de la qualité du pré-dimensionnement des composants du véhicule. En revanche, il est nécessaire de coupler ces outils avec des outils de dimensionnement optimal de composants afin d'obtenir des caractéristiques adaptées au véhicule et à son usage.

### **5.4.2.1 Cas de l'ACM**

Dans le cas du dimensionnement de la Machine et de son convertisseur un couplage d'outils est nécessaire pour pouvoir s'approcher d'un dimensionnement optimal. En effet, comme illustré au chapitre 4, la loi de gestion d'énergie optimale cherche à satisfaire un critère global qui ne signifie pas forcément une pertinence locale au niveau de chaque composant. L'optimisation énergétique globale sur un cycle donné et sur un véhicule hybride donné avec ses composants prédéfinis pourrait aboutir à une utilisation de l'ACM dans des zones de bas rendement comme c'était le cas de l'exemple du chapitre 4. Etant donné ce couplage fort entre la gestion de l'énergie et le dimensionnement des composants, il serait intéressant de coupler les simulations dans VEHLIB à un logiciel de conception de machines électriques. L'intégration des calculs de la machine électrique dans la boucle de dimensionnement permettrait d'orienter les choix vers des structures plus adaptées à la topologie et à l'usage du véhicule hybride. Une thèse dans l'équipe est prévue pour octobre 2011 et traitera de ce couplage en collaboration avec le G2ELAB de Grenoble.

### **5.4.2.2 Cas du moteur thermique**

Pour le cas du moteur thermique, le même type de démarche est nécessaire. Des logiciels spécialisés dans la simulation des moteurs thermiques comme AMEsim ou GTPower peuvent être utilisés pour un couplage à la procédure de dimensionnement du véhicule. Pour cela l'association avec des spécialistes du domaine est nécessaire. Le réseau MEGEVH dispose en son sein de partenaires experts du moteur thermique comme PSA et l'IFPEN. La tâche 1 du projet MEGEVH-strategy est centrée sur ce type d'activité (cf Figure 5-9).

### **5.4.2.3 Cas des batteries**

En ce qui concerne les batteries, des modèles assez précis qui tiennent compte du vieillissement ne sont pas encore disponibles. Des recherches sont en cours sur ce sujet (projet ANR SIMSTOCK par exemple). Le dimensionnement de ce composant restera encore sur un niveau de performances requises en termes de puissance et d'énergie tout en adaptant la tension au bus continu prévu du véhicule. L'ajustement de la capacité en fonction de l'usage permettra d'atteindre un compromis entre le coût et la durée de vie.

## **5.4.3 Bilan**

Le futur du dimensionnement des composants d'un véhicule réside, très probablement, d'une part dans l'adaptation du véhicule à sa mission et d'autre part dans le couplage des modèles systémiques (comme VEHLIB) avec des modèles fin de dimensionnement de composants.

L'adaptation du véhicule à sa mission passe par une étape de constitution de base de données. Un traitement statistique permettrait de généraliser un cahier des charges qui ne s'appuie plus sur des performances très ponctuelles surestimées mais sur les données réelles les plus probables. Reste à convaincre l'utilisateur final pour une baisse de performances dynamiques éventuelles.

En ce qui concerne le couplage de modèles, des actions ont été menées et d'autres en cours. Dans l'équipe par exemple, il est prévu de coupler VEHLIB à des outils de dimensionnement de machine électrique pour un dimensionnement optimal. Dans le projet MEGEVH-startegy, des actions de ce type concernant le moteur thermique et les machines électriques sont également programmées.

## ***5.5 Perspective sur la prise en compte des contraintes extérieures***

### ***5.5.1 Le triplet conducteur/trafic/infrastructure***

Tout le long de ces travaux, nous avons essayé de tirer le meilleur profil, le plus souvent énergétique, de l'hybridation des sources dans les véhicules. Le critère énergétique pourra s'étoffer comme nous l'avons vu ci-dessus pour tenir compte d'autres externalités. Que ce soit pour l'optimisation de la gestion de l'énergie, pour le choix d'une topologie adaptée ou pour l'aide à un dimensionnement au plus juste, l'usage du véhicule constituait jusque là, et par la plupart des chercheurs dans le domaine, comme une entrée du problème pris de ce fait comme contrainte.

Or il est important de signaler que l'usage qui conduit à une consommation d'énergie d'un véhicule est fortement dépendant des conditions de trafic, de l'infrastructure (profil de pente, virages, feux, zone à vitesse réduite, etc.) et également du comportement de conduite. Si ces différentes dimensions peuvent être utilisées dans les processus d'optimisation, le potentiel d'économie d'énergie attendu par les nouvelles technologies électriques et hybrides pourra être sensiblement augmenté.

### ***5.5.2 Vers la prise en compte du comportement du conducteur***

Nous avons vu aux chapitres 1 et 3 que la commande du véhicule hybride comporte plusieurs niveaux. Un niveau local concerne la commande de chaque sous-système et un niveau global permet de gérer l'énergie à bord du véhicule et assure la transmission des ordres du conducteur. Dans un véhicule automatique (métro sans conducteur par exemple) la mission désirée du véhicule peut être le niveau supérieur de commande remplaçant le conducteur ou peut être simplement intégrée dans le niveau de la gestion globale.

Dans ce dernier cas, il est possible d'assurer la mission du véhicule en termes de distance parcourue pendant un temps donnée avec plusieurs combinaisons possibles de vitesses et d'accélération. Dans les véhicules de Transport en Commun, ces degrés de libertés peuvent être utilisés pour assurer un bon agrément aux voyageurs. Des accélérations constantes avec une dérivée progressive au démarrage (le jerk) sont souvent utilisées. Quand il y a une marge de temps entre deux arrêts, une vitesse qui optimise un critère tel que la consommation d'énergie peut être sélectionnée.

Dans les véhicules particuliers, les marges de manœuvre sont plus importantes car tous les paramètres dynamiques peuvent être manipulés par le conducteur, y compris le temps maximal de trajet. Quand le véhicule est fortement contraint par le trafic, ces marges de manœuvres diminuent considérablement. Mais dans le cas contraire, c'est le conducteur qui choisit ses accélérations et ses vitesses de croisières dans la limite des vitesses tolérées.

Plusieurs études ont montré qu'un potentiel important de réduction de consommation de carburant peut être réalisé par un comportement de conduite économe (comportement connu aujourd'hui par éco-conduite) (Ericsson 2001), (Van Mierlo, G Maggetto, et al. 2004). Ces études ont concerné notamment des véhicules thermiques mais dans un moindre mesure les véhicules électriques (Kuriyama et al. 2010), à pile à combustible (L. Guzzella & A. Sciarretta 2004) ou hybrides (van Keulen et al. 2010).

En dehors des conditions du trafic et de la topologie de la route, les paramètres qui influent sur les gains énergétiques apportés par une éco-conduite concernent le véhicule (par ses forces résistantes) et la motorisation (selon le rendement du point de fonctionnement). Il est alors possible de concevoir des systèmes qui permettent soit de conseiller le conducteur en temps réel pour adopter les meilleurs choix de conduite, soit de lui fournir hors ligne un diagnostic de son comportement et un outil d'apprentissage des règles de l'éco-conduite a posteriori. Dans ce dernier cas, certaines études rapportent qu'un conducteur ayant reçu une formation d'éco-conduite a tendance à revenir à son comportement initial au bout de quelques mois (Beusen et al. 2009).

Afin d'explorer le potentiel des gains d'énergie sur différents types de véhicules, une thèse a débuté en octobre 2010 en co-encadrement avec le laboratoire AMPERE de Lyon 1. Il est prévu dans cette thèse qu'un état de l'art soit fait sur les méthodes existantes d'optimisation des trajectoires des véhicules dans un but d'aide à l'éco-conduite. Ensuite des méthodes d'optimisation seront développées pour chaque type de véhicule : thermique, électrique ou hybride. Ces méthodes permettront de déduire la trajectoire optimale du véhicule. L'analyse et la comparaison des résultats des différentes motorisations permettront de hiérarchiser les gains relevant du véhicule en général et de la motorisation. Un accent particulier sera mis sur le véhicule hybride pressenti comme le cas le plus complexe à étudier. En effet, le comportement d'éco-conduite peut dans certains cas interférer avec les lois de gestion de l'énergie qui tentent de leur côté de minimiser la consommation.

L'optimisation des trajectoires vont se faire dans un premier temps sans contraintes en supposant un trafic fluide et un conducteur parfait. Seulement, certaines trajectoires optimales pourront aboutir à une dynamique du véhicule non compatible avec les conditions de trafic ou avec la sécurité.

Il est de ce fait important, par la suite, d'intégrer les différentes contraintes. Une collaboration avec d'autres laboratoires de l'IFSTTAR est prévue à cet effet. Les trajectoires générées par simulation seront soumises à des échantillons de conducteurs sur un simulateur de conduite. Une démarche itérative permettrait d'affiner les algorithmes et de proposer un système d'aide à l'éco-conduite compatible avec les différentes situations.

### ***5.5.3 Les NTIC pour la prise en compte du trafic et de l'infrastructure***

Indépendamment du comportement du conducteur, la topologie de la route et l'agencement des infrastructures de transport ont un impact direct sur la consommation de carburant. Les véhicules hybrides ou multi-sources ayant la capacité de récupérer l'énergie au

freinage ont une consommation énergétique encore plus sensible à la pente de la route. Pour un véhicule hybride thermique électrique par exemple, il est énergétiquement avantageux de pouvoir récupérer le maximum d'énergie en descente. Dans le cas d'un dimensionnement limité de la batterie par exemple, une anticipation permettrait de décharger celle-ci avant le début de la descente. Pour intégrer ce type d'anticipation dans les lois de gestion de l'énergie, il est important de disposer d'information en temps réel sur la pente de la route. Aujourd'hui, certains types de GPS fournissent cette information mais la précision reste souvent insuffisante. Un GPS couplé à une base de données topographique précise pourrait constituer une meilleure solution. Une communication continue avec l'infrastructure (« Vehicle to Infrastructure : V2I ») qui disposerait de base de donnée topographique locale est une voie de recherche dans ce sens (Santa et al. 2008).

En ce qui concerne le trafic, ces mêmes outils d'information et de communication vont permettre de fournir des renseignements sur les conditions de roulage avenir. Pour les lois de gestions de types prédictives, à l'image de la stratégie  $\lambda$ -contrôle détaillée dans le chapitre 3, une connaissance de ce type permettrait une anticipation sur la réactualisation du paramètre de Lagrange  $\lambda$ .

#### **5.5.4 Bilan**

Le comportement de conduite, comme le profil de l'infrastructure et le trafic qui en découle, sont des éléments qui influencent directement la consommation de l'énergie d'un véhicule. Le véhicule multi-sources aura la possibilité de récupérer l'énergie au freinage et sa consommation sera d'autant plus affectée par ces éléments. La procédure d'optimisation de l'énergie qui s'appuyait sur des profils de vitesse normalisés ou enregistrés pourrait intégrer ces éléments en profitant du développement des NTIC. Elle pourrait également s'adapter au conducteur en lui suggérant le comportement le plus optimal.

### **5.6 Conclusion**

Les véhicules hybrides thermiques-électriques permettent par un dimensionnement et une gestion de l'énergie appropriés de réduire les consommations de carburant et les émissions de polluants. La diversité future de l'énergie permet d'envisager des véhicules intégrant plusieurs sources qui peuvent être utilisées pour une conception et une utilisation encore plus optimale. Plusieurs travaux de recherches sont initiés sur cette thématique de véhicule multi-sources. La complexité et la transdisciplinarité de ces véhicules imposent une approche systémique bien structurée. Les travaux réalisés dans le cadre du réseau MEGEVH sur le stockage mixte utilisant la REM seront étendus au cas du véhicule multi-sources. En ce qui concerne la gestion de l'énergie, certains concepts d'optimisation de la gestion de l'énergie pourraient être également étendus à ce type de véhicule. En revanche, une généralisation permettant une articulation systématique entre les différents niveaux de commande est nécessaire. L'approche systémique globale et coopérative mise en place dans le réseau MEGEVH montre ici tout son intérêt. L'utilisation d'outils structurants à l'image de la REM et de modèle validés de sous – systèmes et de véhicules dans VEHLIB couplée à une expertise forte de laboratoires dans le domaine des machines électriques et de leurs commandes, des piles à combustibles et de moteurs thermiques permettra de couvrir les différents aspects pour une conception adaptée et une gestion optimale des véhicules multi-sources. Le projet structurant MEGEVH- strategy en sera une illustration.

## 6 Conclusion générale

Une approche systémique s'appuyant sur la modélisation et les essais de véhicules hybrides et de leurs composants a été mise en place en collaboration avec les membres de l'équipe Véhicules Electriques et Hybride et présentée dans ce mémoire. Cette approche a permis de développer des outils de simulations dans l'optique de traiter, d'un point de vue énergétique notamment, la diversité des topologies et des dimensionnements de ce type de véhicules. Tout le long de ces travaux, il a été mis en évidence le couplage fort qui existe entre la topologie de la chaîne de traction, le dimensionnement des composants et la gestion de l'énergie pour un usage donné du véhicule hybride. Nos divers développements sur les véhicules hybrides ont été capitalisés au travers du logiciel de simulation VEHLIB, mis en place dans les années 90 par l'équipe, et qui a su évoluer en intégrant de nouveaux modèles et de nouvelles méthodes, comme par exemple la REM. Il est à noter que la dimension systémique et multidisciplinaire des travaux engagés a été renforcée par les collaborations au sein de MEGEVH, où chacun des partenaires apporte ses propres compétences. La REM, formalisme systémique développé par le L2EP de Lille, a été un outil fédérateur dans ce sens. L'équipe a été un acteur important du réseau tout en apportant son expertise.

Cette gestion de l'énergie représente la commande au niveau global du véhicule hybride et permet, à partir de la demande du conducteur, de répartir instantanément cette demande entre les deux sources d'énergie, tout en contrôlant l'état de charge de l'élément de stockage. La stratégie choisie pour cette gestion conditionne directement les performances énergétique et environnementale du véhicule hybride. Pour cela, et après l'étude et l'amélioration des lois de gestion basées sur des règles expertes, l'étude de lois de commande optimales en énergie a été entreprise. Deux co-encadrements de thèse ont permis de tester des méthodes d'optimisation hors ligne puis leur utilisation en ligne et en temps réel. La validation de ces lois de commande et de leur apport en termes de consommation de carburant a été réalisée sur un banc moteur dynamique du laboratoire en configuration « HIL » (Hardware-In-the-Loop simulation). Dans cette configuration où une partie du véhicule est émulée, la commande mise en œuvre est appliquée en temps réel à la chaîne de traction hybride présente sur le banc.

En plus d'une gestion de l'énergie optimale, un dimensionnement adapté de l'élément de stockage par rapport au cahier des charges est un élément clé pour diminuer le surcoût engendré par l'hybridation. Pendant longtemps, une des idées reçues était une augmentation continue de gain de consommation avec l'augmentation du taux d'hybridation (rapport entre la puissance de la batterie et la puissance totale du véhicule). Or les outils d'aides au dimensionnement mis en place dans l'équipe ont montré que, moyennant des hypothèses simplificatrices à approfondir, le taux d'hybridation peut présenter un optimum selon le cycle d'usage et selon les hypothèses en question.

Ces mêmes problématiques de gestion de l'énergie et de dimensionnement des composants se posent actuellement dans les véhicules multi-sources. La multiplicité des sources, suggérée par une diversité future des types d'énergie embarquée, peut constituer un atout important si les différents degrés de libertés introduits sont correctement exploités. En effet, comme le véhicule hybride thermique-électrique, l'addition de composants supplémentaire dans le véhicule multi-sources conduit à un surcoût qui doit être amorti par un apport énergétique et environnemental. Cet apport sera d'autant plus important que l'optimisation couvre les différentes dimensions.

Les recherches dans ce domaine sont aujourd'hui à leur début. La complexité des topologies futures impose une meilleure structuration des approches de modélisation et de commande. L'utilisation de la REM qui a montré sa performance pour la généralisation des modèles hybrides et pour la modélisation et la commande du stockage mixte batterie/supercondensateur va être étendue à des véhicules multi-sources. Ce projet d'extension fait l'objet de deux actions dans le réseau MEGEV : MEGEVH-multistock et MEGEVH-strategy. Une extension des méthodes d'optimisation de gestion de l'énergie développées pour le véhicule hybride thermique-électrique constitue également une piste de recherche à approfondir. Cette extension ne rentre pas en concurrence avec l'utilisation de la REM pour la synthèse systématique de la commande, mais fera partie des aspects à considérer pour une articulation entre les différents niveaux de commande. En effet, jusque là, les deux niveaux de commande ont souvent fait l'objet d'études séparées. Le niveau local, relevant plutôt du domaine du génie électrique (sauf pour le moteur thermique) ; soit s'est arrêté au niveau des consignes demandées aux sous-systèmes, soit a utilisé des stratégies basiques de gestion globale de l'énergie. Par opposition, le niveau global a été plus étudié par les automaticiens avec un accent sur les méthodes mathématiques de commande globale qui permettent de générer les consignes appropriées à chaque organe. Ces consignes sont ensuite testées avec des modèles de composants généralement simplifiés. La convergence entre les deux approches est aujourd'hui nécessaire pour réussir une commande globale optimisée intégrant les aspects dynamiques des différents composants.

D'autres ouvertures qui relèvent de dimensions non prises en compte jusqu'à maintenant dans nos travaux sont également à considérer. En effet, les évaluations, les optimisations et les dimensionnements des véhicules s'appuient de plus en plus sur des profils de vitesse normalisés ou d'utilisation réelle enregistrée lors de campagnes de mesures à l'échelle nationale ou Européenne. Cette approche, prenant comme contrainte des profils figés, a le mérite d'être pratique pour la comparaison des performances énergétiques et environnementales des véhicules. En revanche elle ne permet pas de prendre en compte la variabilité due au comportement de conduite, des conditions de trafic et de la topologie de la route. Ces trois aspects peuvent être une source supplémentaire d'optimisation de la gestion de l'énergie. Les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication joueront un rôle important dans cette gestion.

Du point de vue des critères d'évaluation et d'optimisation des véhicules hybrides, les critères énergétiques et environnementaux (au sens émissions de polluants) ont été les plus utilisés dans la littérature. Or dans les véhicules futurs multi-sources, en plus des problèmes existants de disponibilité de ressources pour le véhicules conventionnel, se pose la question de l'extraction et de la consommation mondiale de matériaux spécifiques. Se pose également la question épineuse de la viabilité économique de ces nouvelles technologies de l'énergie embarquée, pouvant aggraver les fractures sociales entre ceux qui pourrait accéder à ces produits et ceux qui ne le pourront pas. Les techniques d'analyses de cycle de vie apportent des réponses encore parcellaires malgré les progrès réalisés dans ce domaine. La disponibilité de bases de données exhaustive, fiables et accessibles est aujourd'hui loin d'être acquise. L'approche globale dite du développement durable, où tous les aspects (économiques, environnementaux, et sociaux) sont considérés, serait probablement la plus à même de qualifier les solutions de mobilité du futur.

**7 ANNEXES**



## 7.1 Annexe 1 : Réseau MEGEVH

<http://l2ep.univ-lille1.fr/megevh/>



### 7.1.1 Historique et pilotage

Deux opérations thématiques travaillaient sur les véhicules hybrides dans le cadre du réseau RT3 (Recherche Technologique sur les Transports Terrestres) du Ministère de la Recherche. L'opération VYGHO a pour objectif d'améliorer la gestion énergétique des véhicules hybrides. L'opération IMHOTEP a pour objectif d'établir des passerelles entre divers outils de modélisation de véhicules hybrides. Le rapprochement de ces deux opérations s'est concrétisé par la mise en place du projet MEGEVH (Modélisation Energétique et Gestion d'Energie de Véhicules Hybrides) en 2005 dont la structuration repose sur l'organisation suivante :

- un socle commun de modélisation et d'optimisation énergétique pour véhicule hybride,
- différentes applications utilisant les « outils » développés dans le socle.

Initialement, deux applications ont été envisagées suite aux travaux engagés par les deux projets initiaux. Elles concernaient des véhicules réels dont les différences pouvaient permettre de les considérer comme véhicules de référence :

- véhicule hybride de type série, application militaire, DPE 6x6, de GIAT Industries (devenu Nexter Systems),
- véhicule hybride de type parallèle, application "véhicule particulier", Toyota Prius II, du LTE-INRETS (devenu LTE-IFSTTAR).

En 2011, le réseau est coordonné par Alain Bouscayrol (Professeur à l'Université Lille1, L2EP) et les membres du comité scientifique sont : Daniel Hissel (Professeur à l'Université de Franche Comté, FEMTO-ST), Rochdi Trigui (Chargé de Recherche à l'IFSTTAR, LTE), Sébastien Delprat (Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis., LAMIH).

### 7.1.2 Objectifs et organisation scientifique

L'objectif de MEGEVH est de promouvoir les collaborations scientifiques dans le domaine de la gestion d'énergie de véhicules électriques et hybrides entre partenaires académiques et industriels au niveau national. MEGEVH vise ainsi à organiser les développements scientifiques sur ce thème afin de favoriser l'intégration des ces véhicules en France, et en particulier de favoriser les développements d'industriels français.

L'organisation scientifique de MEGEVH est structurée en deux niveaux :

- un niveau théorique dans lequel des méthodologies génériques sont développées indépendamment du type de véhicule ;

- un niveau pratique dans lequel des plateformes technologiques et des véhicules sont utilisés pour valider les concepts développés dans le niveau théorique.

Le niveau théorique est composé de 3 opérations transversales (qui concernent l'ensemble du véhicule) et de 2 opérations locales (qui concernent des sous-systèmes sensibles) :

- MEGEVH-macro, opération transversale sur la modélisation systémique des véhicules électriques et hybrides,
- MEGEVH-strategy, opération transversale sur la structuration de la commande des véhicules électriques et hybrides,
- MEGEVH-Optim, opération transversale sur l'optimisation énergétique en temps réels des véhicules électriques et hybrides,
- MEHEV-FC (Fuel Cell), opération locale sur l'étude des sous-systèmes à Pile à Combustibles pour véhicules électriques et hybrides,
- MEGEVH-Storage, opération locale sur l'étude des sous-systèmes de stockage d'énergie pour véhicules électriques et hybrides.

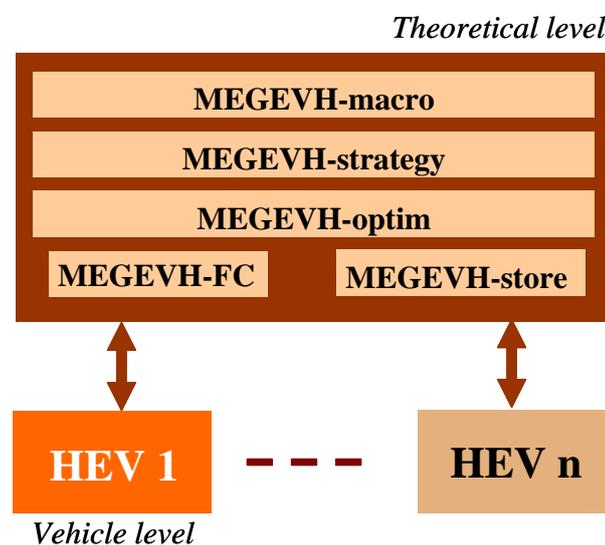


Figure 7-1 : organisation scientifique de MEGEVH

Le niveau pratique est composé de 3 plateformes d'essai et de véhicules de références :

- plateforme « Commande temps réel » du L2EP de Lille, dédiée au test d'algorithme de commandes pour des sous-systèmes de véhicules électriques et hybrides,
- plateforme « Systèmes de stockage et de sources » de FEMTO-ST de Belfort, dédiée à la caractérisation de sous-systèmes de génération et de stockage d'énergie,
- plateforme « Evaluation véhicule » du LTE de Bron, dédiée à la caractérisation dynamique et énergétique de véhicules électrique et hybrides
- le DPE 6x6, de Nexter Industrie, démonstrateur d'un véhicule hybride série de type poids lourd militaire ;
- la Toyota Prius II, du LIE-IFSTTAR, véhicule hybride série-parallèle commercial,
- le HY 3008, de PSA Peugeot Citroën, prototype hybride double parallèle avec moteur diesel,
- ECCE, de FEMTO-St, démonstrateur de véhicule hybride multi-source avec Pile à Combustible

- ARCHYBALD, de Nexter Systems, prototype virtuel de véhicule hybride poids lourd avec double train planétaire (application militaire et civile), en cours de développement,
- HyLo, d'Alstom transport, prototype virtuel de locomotive hybride série, en cours de développement.

Les diverses opérations font l'objet de projets dont les financements correspondent à des fonds propres, des conventions CIFRE, des fonds régionaux et FEDER, des projets ANR, des projets FUI...

### 7.1.3 Partenaires et intégrations

En 2011, MEGEVH regroupe 10 laboratoires de recherche (FEMTO-ST, IFP, L2EP, LAAS, LAGIS, Laplace, LAMIH, LGEP, LTE-IFSTTAR, LTN-IFSTTAR), et 7 partenaires industriels (Alstom, LMS Imagine, Nexter Systems, PSA Peugeot Citroën, Renault, Saft et Valéo). D'autres partenaires sont en phase d'intégration suite à la procédure mise en place par le comité de pilotage.



Figure 7-2 : carte des partenaires MEGEVH

Pour devenir partenaire, il faut assister à deux séminaires semestriels et y présenter ses activités sur les véhicules électriques et hybrides. Une demande d'intégration peut alors être faite et sera examinée par le Comité Scientifique.

Une procédure de labellisation a été mise en place pour soutenir les projets lors de demande suite à des appels d'offre. Un projet MEGEVH doit être porté par un membre de MEGEVH, avoir au moins deux partenaires membres de MEGEVH et rentrer dans la politique scientifique de MEGEVH.

Des partenariats privilégiés sont aussi établis avec les Pôles de Compétitivité « Moveo » (Ile-de-France et Normandie), « Véhicule du Futur » (Alsace et Franche-Comté) et « i-Trans » (Nord-Pas-de-Calais et Picardie). Les projets MEGEVH sont souvent co-labélisés avec des pôles de compétitivité.

Des collaborations avec partenaires étrangers reconnus ont été initiées au travers de projets MEGEVH :

- Harbin Institute of Technology (China), au travers de MEGEVH-EVT (Electric Variable Transmission), avec LTE, FEMTO-ST et L2EP,

- Institut de Recherche en Hydrogène et Université du Québec à Trois Rivières (Canada), au travers du projet GeVePàC, avec FEMTO-ST, L2EP et LTE
- University of Carlos III of Madrid (Espagne) et Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse) au travers du projet Multi-Stock, avec L2EP et LTE.

#### **7.1.4 Animation scientifique et promotion**

L'animation scientifique de MEGEVH est réalisée au travers de séminaires semestriels au cours desquels sont présentes l'avancée des activités de collaborations en cours (thèses co-encadrées en particuliers), des activités propres de partenaires, des visites de plateformes, les bilans des activités de promotion, la définition de la politique scientifique.

D'autre part une forte activité de promotion à l'international est réalisée au travers d'organisation des sessions invités dans des conférences (IEEE-VPPC'06, IEEE-VPPC'08, IEEE-VPPC'09, IEEE-VPPC'10, IEEE-VPPC'11, ElectrIMACS'08), de tutoriaux dans des conférences internationales (IEEE-VPPC'09, EVS'24, IEEE-IECON'09), et l'organisation de séminaires par des personnalités étrangères reconnues (Mr K. Hamada, Toyota Motor Corp., Prof. C. C. Chan, University of Hong-Kong, Prof. A. Emadi, Illinois Institute of Technology, Prof. C. Mi, University Dearborn Michigan).

MEGEVH soutient aussi les conférences, séminaires et workshop de ses partenaires (Mobilis, AEA, école d'été EMR, journées du Club EEA...). Cet investissement régulier et important a porté ses fruits par l'obtention de l'organisation de la conférence internationale IEEE-VPPC'10 (Vehicle Power Propulsion Conference) par MEGEVH, à Lille en Septembre 2010 (<http://www.vppc2010.org/>)

#### **7.1.5 Bilan scientifique depuis 2005**

En 2011, on peut comptabiliser 6 thèses soutenues et 7 thèses en cours dans le cadre des projets MEGEVH, toutes faisant l'objet d'une collaboration et/ou d'un co-encadrement entre partenaires MEGEVH.

Ces activités ont permis de réaliser 5 publications communes dans des revues de rang A et d'obtenir le « Paper Prize Award » à IEEE-VPPC 2008, article co-signé par le L2EP, FEMTO-ST et le LTE, publié par la suite dans IEEE Vehicular Technology Magazine [Chen 08].

MEGEVH a permis aussi d'attirer 2 post-doctorants étrangers au sein du réseau pour des travaux collaboratifs :

- Dr. Yuan Cheng (Harbin Institute of Technology), projet MEGEVH-EVT (2009-2011)
- Dr. Lucia Gauchia (University of Carlos III of Madrid), projet MEGEVH-Multistock (2011)



Figure 7-3 : Remise du « Paper Prize Award » lors d'IEEE-VPPC 2008

## **7.2 Annexes 2 : Pollution atmosphérique et normes pour les véhicules automobiles**

### **7.2.1 Les phénomènes engendrés par les émissions de polluants**

Pour la pollution atmosphérique, les phénomènes mis en jeu sont principalement les suivants.

- l'acidification ou pluies acides : c'est la transformation de l'eau des pluies suite à la dissolution de certains polluants existants dans l'atmosphère. Les polluants responsables sont  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  et qui peuvent se transformer en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$  ainsi qu'en acide sulfurique et en acide nitrique. Cette acidification de l'eau entraîne des modifications importantes de la faune piscicole et des écosystèmes forestiers ;

- l'eutrophisation : c'est la dégradation des sols et des eaux par excès de nutriments. Dans le cas des polluants atmosphériques, elle correspond à un excès d'azote provenant principalement des  $\text{NO}_x$  et  $\text{NH}_3$ . Dans certains cas la capacité des écosystèmes ne parvient pas à absorber cet excès;

- la pollution photochimique : il s'agit d'un phénomène complexe qui fait intervenir des polluants primaires comme les  $\text{NO}_x$  et les Composés Organiques Volatils (COV) et le rayonnement ultraviolet solaire pour donner lieu à la formation d'ozone et d'autre composés oxydants. Contrairement à l'ozone de la stratosphère (19-30 km d'altitude), l'ozone formé à faible altitude a des effets néfastes sur la santé humaine et sur les écosystèmes;

- l'appauvrissement de la couche d'ozone : à 25 km d'altitude, l'ozone, composant prépondérant, permet l'absorption de rayonnements UV solaire responsables de risque de cancer cutané. Certains polluants comme le NO et les CFC<sup>14</sup> sont à l'origine de la destruction de l'ozone et l'apparition de zones vulnérables aux UV;

- effet direct et indirect sur la santé : à l'origine d'irritation oculaires dans les embouteillages, les particules fines issues de la combustion auraient des effets sur la santé pas encore complètement connus.

---

<sup>14</sup> Composés Fluorocarbures

## 7.2.2 Normes pour véhicules diesel, valeurs en mg/km

Les normes Européennes de pollution pour les véhicules diesel et leur évolution sont données sur le tableau suivant.

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6 <sup>[2]</sup>
Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> )	-	-	500	250	180	80
Monoxyde de carbone (CO)	2720	1000	640	500	500	500
Hydrocarbures (HC)	-	-	-	-	-	-
HC + NO <sub>x</sub>	970	900	560	300	230	170
Particules (PM)	140	100	50	25	5	5
Particules (P)*	-	-	-	-	-	-

(\*) Nombre de particules. Une valeur limite doit être définie au plus tard pour la date d'entrée en vigueur de la norme Euro 6 (source Wikipedia).

## 7.2.3 Normes pour véhicules à essence, valeurs en mg/km

Les normes Européennes de pollution pour les véhicules diesel et leur évolution sont données sur le tableau suivant.

Norme	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	Euro 6 <sup>[2]</sup>
Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> )	-	-	150	80	60	60
Monoxyde	2720	2200	2200	1000	1000	1000
Hydrocarbures (HC)	-	-	200	100	100	100
Particules (PM)	-	-	-	-	5 <sup>(*)</sup>	5 <sup>(*)</sup>
Particules (P)**	-	-	-	-	-	-
Hydrocarbures non méthanique (HCNM)	-	-	-	-	68	68

(\*) Uniquement pour les voitures à essence à injection directe fonctionnant en mélange pauvre (combustion stratifiée)

(\*\*) Nombre de particules. Une valeur limite doit être définie au plus tard pour la date d'entrée en vigueur de la norme Euro 6. (source Wikipedia).

## 7.2.4 Comparaison des normes de pollution des véhicules en France aux Etats Unis et au Japon

La Figure 7-4 représente une comparaison, dans l'espace des polluants réglementés, entre les normes d'émission de polluants par les véhicules essence et diesel pour le cas de l'Europe, le Japon et les Etats-Unis.

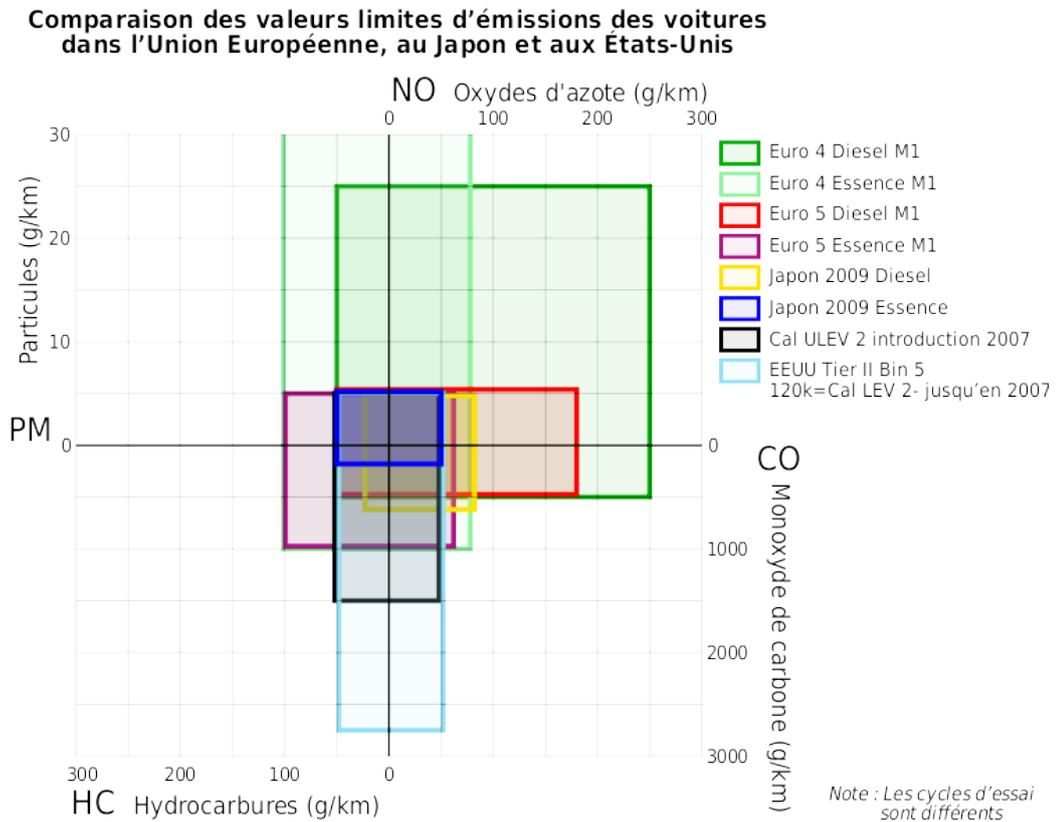


Figure 7-4 : Comparaison émissions de polluants réglementés en Europe, Japon et Etats-Unis (source Wikipedia).



## 7.3 Annexe 3 : Différents niveaux de modèle de l'association convertisseur-machine électrique dans VEHLIB.

### 7.3.1 Définitions et représentations

Dans la traction électrique et hybride, les moteurs électriques sont souvent associés à des transformateurs, constitués de composants électroniques de puissances, appelés convertisseurs. Ces derniers permettent, par une commande appropriée de fermeture et d'ouverture des composants (souvent transistors de type IGBT), de commander les courants dans le moteur pour fournir un couple demandé à partir d'une alimentation par une tension continue telle que celle d'une batterie par exemple. Il existe plusieurs types d'Association Convertisseur Machine (ACM), les plus utilisés sont représentés sur la Figure 7-5.

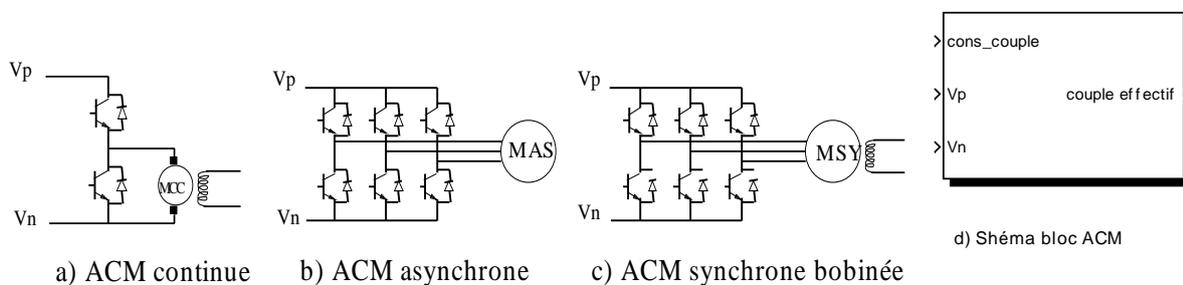


Figure 7-5 : schémas électriques des ACMs usuelles et leur représentation commune en schéma bloc .

Etant donné que toute ACM présente la fonction d'un transformateur électro-mécanique à partir d'une tension continue ( $V_p-V_n$ ), la représentation que nous adoptons pour le schéma bloc de ce type de système est commune à toutes les ACM (Figure 7-5 d)).

C'est à l'intérieur de ce bloc que sont éventuellement distinguées les types d'ACM et la finesse de leurs modèles, selon le niveau de modélisation choisi.

### 7.3.2 Modèle comportemental quasi-statique

Le modèle énergétique (ou comportemental quasi-statique) d'une ACM permet de produire un couple sur l'arbre du moteur et calculer le courant nécessaire coté alimentation continue pour une sollicitation de couple demandée et une tension continue ( $V_p-V_n$ ) disponible. Ce modèle ne se réfère ni aux paramètres électriques du moteur ni aux composants électroniques du convertisseur, mais uniquement au principe de la conservation de l'énergie pendant le transfert (de l'électricité vers la mécanique et vice versa). De ce fait, le modèle énergétique est bi-directionnel et est indépendant de la technologie du moteur et du convertisseur (valable pour toute ACM). Il utilise une « cartographie » de rendement ou de perte de l'ensemble ACM selon le couple et la vitesse de rotation, à l'image de la Figure 7-6. L'intérieur du schéma bloc de ce type de modèle est présenté sur la Figure 7-7.

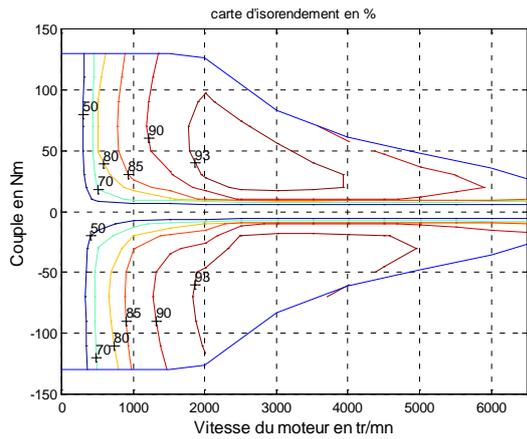


Figure 7-6 : Exemple d'isorendement et d'enveloppe maximale d'une ACM

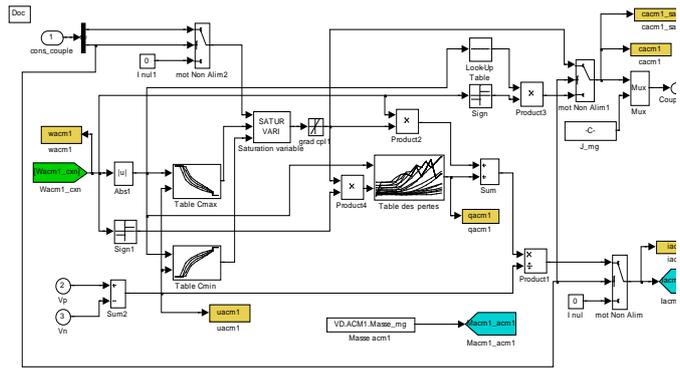


Figure 7-7 : Intérieur du schéma bloc du modèle comportemental quasi-statique

### 7.3.3 Modèle de connaissance dynamique

Ce type de modèle implique une dissociation en différents sous modèles : le moteur électrique, les convertisseurs et la commande. Il est de ce fait propre à chaque type d'ACM. Pour illustration, nous considérons l'exemple du modèle ACM synchrone bobinée dont l'intérieur du schéma bloc est représenté sur la Figure 7-8.

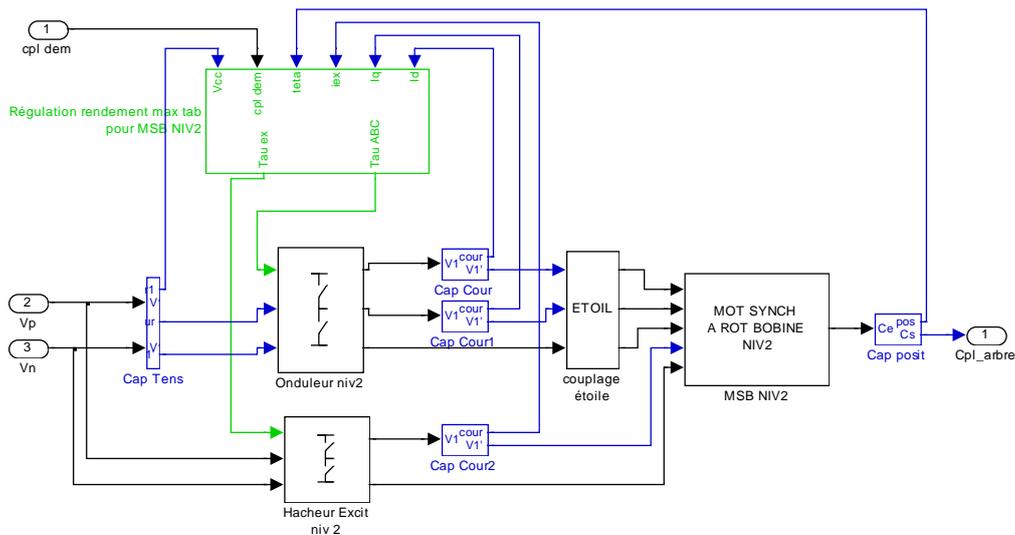


Figure 7-8 ; Intérieur du bloc ACM synchrone bobinée dans le cas d'une modélisation de niveau 2

Nous pouvons vérifier que les entrées/sorties sont identiques à celles du modèle comportemental quasi-statique. En revanche, tout en respectant le formalisme de connexion entre les différents blocs, nous constituons le système ACM par l'association d'un modèle d'onduleur triphasé, un modèle de hacheur pour l'excitation, un modèle électromécanique du moteur synchrone à rotor bobiné ainsi qu'une commande qui transforme la demande de couple en une demande régulée des courants. Les blocs bleus représentent les capteurs (tension, courant, vitesse, position ...) nécessaires pour l'élaboration de la commande.

### **7.3.4 Modèle de connaissance quasi-statique**

Il s'agit d'un compromis entre les deux niveaux précédents. Ce type de modèle implique aussi une dissociation en différents sous modèles, et utilise les équations électriques. En revanche, dans ces dernières on néglige les phénomènes transitoires les plus rapides. Ainsi la régulation des courants, consommatrice de temps de calcul, est supposée parfaite.

De ce fait, pour une commande en couple, deux possibilités sont envisageables :

- On considère que la réponse des courants est instantanée par rapport aux autres phénomènes pris en compte dans le système véhicule. Dans ce cas la réponse du couple est aussi instantanée,
- On suppose que les courants répondent à la demande avec une constante de temps identifiée ou estimée. Cette constante dépend de la performance des régulateurs mis en œuvre et dont on suppose leur comportement parfait.



## 7.4 Annexe 4 : Les différents modèles de batterie dans VEHLIB

### 7.4.1 Modèle statique

Si on s'appuie sur l'expérience des modèles de différents niveaux du moteur thermique et de l'ACM, la logique voudrait que l'on réalise une cartographie de perte de la batterie en fonction du courant et de la tension pour réaliser son modèle comportemental statique. Seulement, le passage à un modèle électrique équivalent, motivé par les raisons expliquées au chapitre 2, peut donner une autre perspective de hiérarchisation entre les niveaux de modèle de la batterie. En effet le modèle statique peut être représenté par un circuit électrique très simple comme le montre la Figure 7-9.

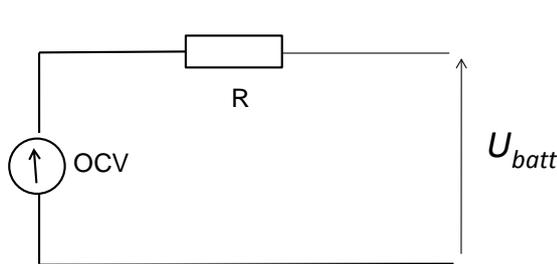


Figure 7-9 : Modèle statique de la batterie utilisant un circuit électrique simple.

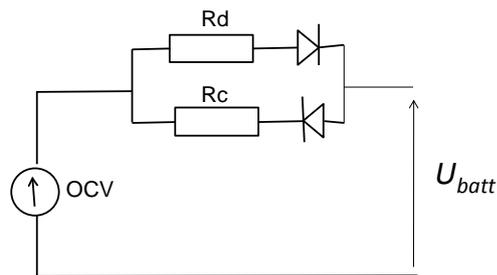


Figure 7-10 : Modèle statique de la batterie utilisant un circuit électrique avec distinction de la résistance en charge et en décharge.

Il s'agit de considérer une résistance de valeur constante mise en série avec une source de tension idéale représentant la tension à vide de la batterie. Ce modèle est un peu éloigné de la réalité mais permet d'avoir une première approximation permettant la mise au point et la vérification de fonctionnalité d'architectures hybrides. Sur le plan énergétique ce type de modèle peut avoir une légitimité si l'on se limite à une zone prédéfinie d'état de charge de la batterie et l'on suppose que la température ne varie pas sensiblement. Dans certains couple électrochimique comme le NiCd, une variation importante entre les paramètres du circuit en charge et en décharge peuvent conduire à la distinction d'une résistance de charge  $R_c$  et d'une de décharge  $R_d$  comme le montre le circuit de la Figure 7-10.

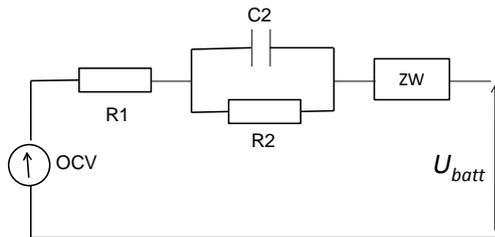
### 7.4.2 Modèle statique à paramètres variables

Le modèle de statique à paramètres variables reprend les mêmes structures de la Figure 7-9 et de la Figure 7-10 tout en introduisant les dépendances des paramètres du modèle aux phénomènes les plus influents dont les principaux sont la température, l'état de charge de la batterie et l'état de vieillissement. Certaines technologies de batterie montrent également des sensibilités des paramètres du modèle à l'amplitude du courant (M. Montaru & Pelissier 2008).

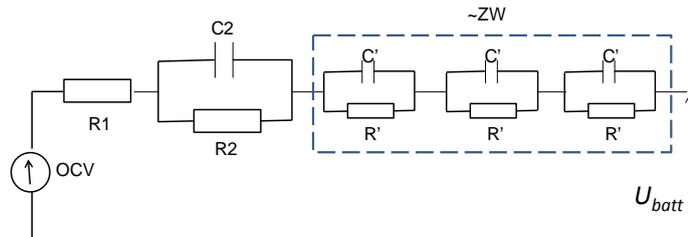
### 7.4.3 Modèle dynamique

Le modèle dynamique de la batterie s'appuie également sur les circuits électriques équivalents en prenant en compte les principales dynamiques du système selon les phénomènes considérés. Dans notre cas, en plus des chutes ohmiques dues aux connexions, trois phénomènes électrochimiques sont pris en compte et modélisés.

- Le phénomène de double couche : représenté généralement par un effet capacitif global, il est matérialisé sur le schéma équivalent de la Figure 7-11 par la capacité C2 ;
- Le phénomène de transfert de charge qui représente la cinétique de la réaction électrochimique est représenté par la résistance R2 ;
- Le phénomène de diffusion : induit par la consommation et la production d'espèces à l'interface. Il est représenté sur le circuit de la Figure 7-11 par une impédance dite de Warbourg. Cette impédance non conventionnelle (pseudo-capacité appelée aussi Constant Phase Element) peut être approximée par une infinité de R'//C' en cascade. Le modèle de la Figure 7-12 est une approximation du modèle complet avec 3 R'//C'.



**Figure 7-11 : Modèle électrique équivalent de la batterie utilisant une impédance de Warbourg**



**Figure 7-12 : Modèle électrique équivalent de la batterie avec une approximation de la diffusion par 3 circuit R'//C'.**

A noter que tous les paramètres du modèle de dynamique sont variables en fonction de la température et l'état de charge de la batterie.

## 7.5 Annexe 5 : Présentation de la plateforme expérimentale du LTE de l'IFSTTAR

### 7.5.1 Présentation du banc dynamique

Le banc d'essai moteur du Laboratoire Transports et Environnement (LTE) de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR, ex INRETS) (Figure 7-13 et Figure 7-14) est constitué de deux grandes parties : une fournie par un constructeur de banc (AVL), et une développée à l'IFSTTAR avec pour chaque parties un « volet » logiciel et un « volet » matériel (B. Jeanneret et al. 2004).

La première partie (APA AVL) est composé de :

- une machine asynchrone (frein dynamique APA AVL) haute dynamique (de  $-300$  à  $+300$  Nm en quelques ms) ;
- une armoire de puissance ;
- un logiciel d'acquisition et de commande (PUMA, EMCON 300).

L'ensemble fournit dans les deux cadrant  $120$  kW crête avec un couple maximum de  $350$  Nm et une vitesse maximale de  $10000$  tr/min.

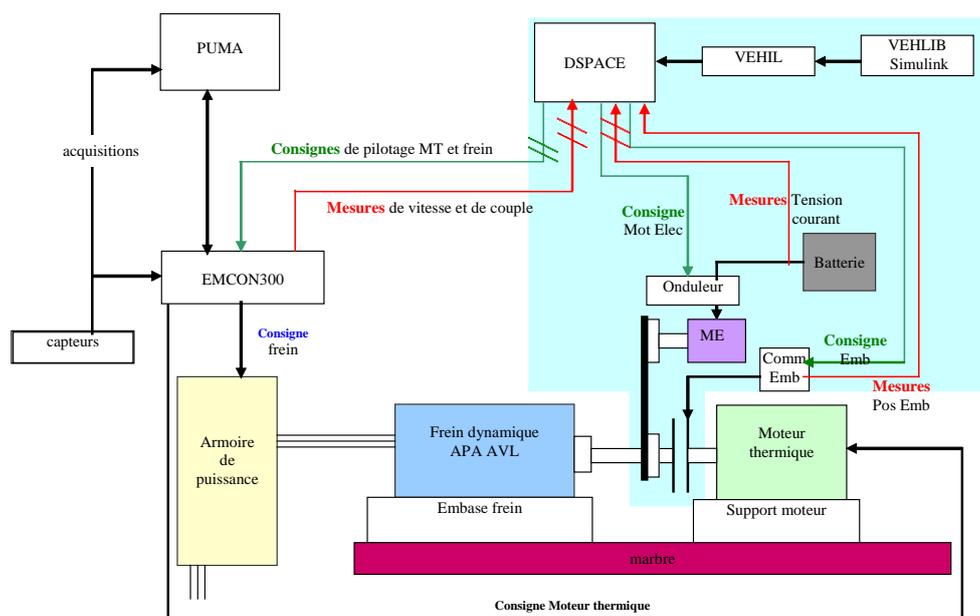


Figure 7-13. Architecture du banc d'essai moteur INRETS du LTE

La seconde partie a été développée par l'équipe « Véhicules Electriques et Hybrides » du LTE. Elle est composée de :

- un moteur thermique (moteur Renault K9K 702 diesel  $1,5$  dCi –  $1461$  cm<sup>3</sup> –  $80$  ch) ;
- un moteur électrique et onduleur de ( $9$  ou  $15$  kW crête selon la configuration) ;
- un accouplement par courroie du moteur électrique ;
- un embrayage entre le moteur électrique et le moteur diesel ;

- une commande d'embrayage par un vérin hydraulique actionné par un moteur électrique et son convertisseur (temps de réponse  $< 0,2$  s pour réaliser la course entièrement) ;
- une batterie ou un Pack de supercondensateur selo la configuration;
- une configuration dSPACE 1005 + 2201 avec le RTW compatible pour la version 2009a de *Matlab/Simulink*;
- une version temps réel de VEHLIB.

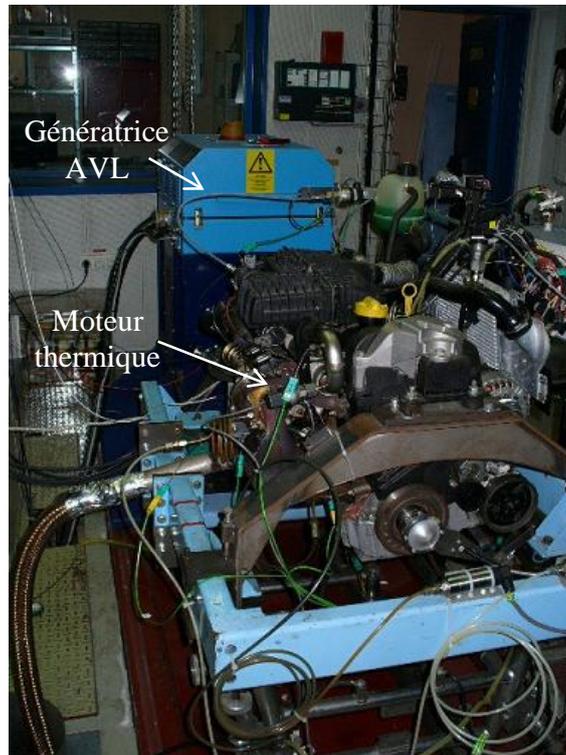


Figure 7-14 : Banc d'essai moteur INRETS du LTE

### 7.5.2 *Moyen de mesure de la consommation et des polluants*

Un équipement scientifique de mesure de polluant par le procédé CVS (Constant Volume Sampling) est commun au banc moteur et au banc à rouleau. Il permet de mesurer les polluants réglementés (CO, HC, NO<sub>x</sub> et particules), de calculer la consommation de carburant à partir du bilan carbone (principalement CO<sub>2</sub>) et d'effectuer des prélèvements pour analyse des polluants non réglementés (HAP, COV ...). Cet équipement est adopté pour les faibles niveaux de polluants rencontrés dans la norme EURO4. Les caractéristiques de cet équipement permettent de mesurer les émissions de la quasi-totalité des véhicules particuliers de différentes technologies (essence, diesel, hybride ...) ainsi que des petits véhicules utilitaires.

Par ailleurs, le banc moteur est muni d'un dispositif de mesure de masse de carburant (balance AVL) avec une possibilité d'échantillonnage permettant d'obtenir un débit instantané de carburant.

## 7.6 Annexe 6 : Le véhicule prototype Microbus de Gruau

Le microbus de la société GRUAU est un véhicule de transport en commun de très petite capacité (22 places). Sa version hybride série (Figure 7-15 et Figure 7-16), dont les caractéristiques sont résumés sur le Tableau 7-1, a fait l'objet de travaux d'évaluation et d'optimisation, spécialement au niveau de la commande, dans le cadre d'un projet Predit financé par l'ADEME et d'une thèse CIFRE associée (Majed Boujelben 2009).

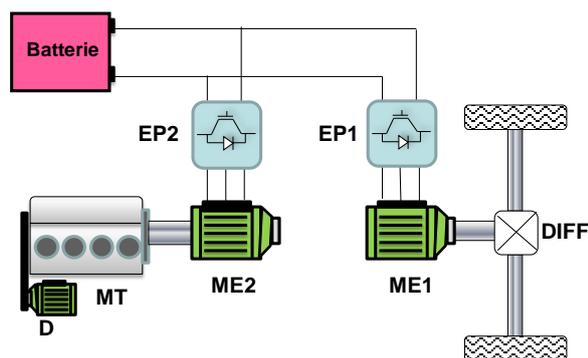


Figure 7-15 : Architecture hybride du Microbus



Figure 7-16 : Le véhicule microbus testé

Tableau 7-1 : Caractéristiques du véhicule microbus hybride

Moteur thermique (MT)		Batterie	
Nb de cylindres	3	Technologie	NiCd
Cylindrée	0.8 L	Capacité nominale (Ah)	100
Puiss. Maxi	30 kW	Tension nominale	32x6=192 V
Générateur (ME2)		Moteur de Traction (ME1)	
Type	Aimant permanent	Type	Asynchrone
Puiss. Max.	30 kW	Puiss. Max.	65 kW
Vitesse Max.	3000 tr/mn	Vitesse Max.	9000 tr/mn
Véhicule			
Masse à vide	3500 kg		



## 7.7 Annexe 7 : méthode du minimum de Pontriaguine

Soit le système décrit par l'équation d'état :

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = g(x(t), u(t), t) \quad (7-1)$$

Et le critère à minimiser sur un horizon de temps (tf-t0) :

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (7-2)$$

Si on considère le Hamiltonien défini par :

$$H(x(t), u(t), \lambda(t), t) = L(x(t), u(t), t) + \lambda^T(t) \cdot g(x(t), u(t), t) \quad (7-3)$$

où  $\lambda$  est le multiplicateur de Lagrange, alors les conditions d'optimalité du critère J sont données par :

$$\dot{x}(t) = \frac{\partial H(x(t), u^*(t), \lambda(t), t)}{\partial \lambda} \quad (7-4)$$

$$\lambda(t) = - \frac{\partial H(x(t), u^*(t), \lambda(t), t)}{\partial x} \quad (7-5)$$

$$H(x(t), u^*(t), \lambda(t), t) \leq H(x(t), u(t), \lambda(t), t) \quad (7-6)$$

La première condition représente l'équation d'état du système, la deuxième permet de calculer la valeur instantanée du vecteur des multiplicateurs de Lagrange et la troisième exprime que la commande optimale  $u^*$  assure un minimum global pour  $H$ .

Pour le cas où  $H$  serait une fonction dérivable, la troisième condition peut être remplacée par l'équation  $\frac{\partial H(x(t), u(t), \lambda(t), t)}{\partial u} = 0$ . Dans ce cas il faut vérifier la condition

$$\frac{\partial^2 H(x(t), u(t), \lambda(t), t)}{\partial u} > 0 \text{ pour s'assurer que l'optimum est un minimum.}$$

Ainsi le problème d'optimisation globale sur l'horizon de temps prédéfini est ramené à une minimisation instantanée du Hamiltonien. En revanche, une connaissance à priori des multiplicateurs de Lagrange est nécessaire pour cette résolution.



## 7.8 Annexe 8 : Résultats expérimentaux du microbus avec stockage mixte

Le microbus de l'IFSTTAR, présenté en annexe 6, a été transformé pour accueillir une batterie de super-condensateur. Cette opération a été réalisée avec la collaboration du Laboratoire des Technologies Nouvelles de l'IFSTTAR. Ce véhicule a été ensuite testé dans une configuration électrique mixte avec batteries / supercondensateurs (Figure 7-17). Il est comparé à un véhicule de référence, le même véhicule pour lequel les supercondensateurs ne sont pas utilisés. Dans les deux cas, le groupe électrogène permettant l'hybridation est maintenu éteint.

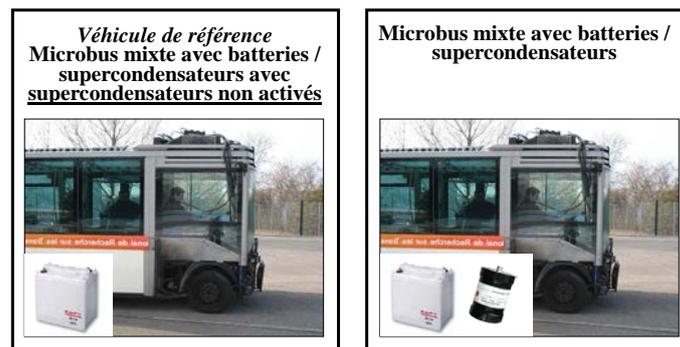


Figure 7-17. Véhicules étudiés

Le trajet considéré est présenté sur la Figure 7-18. Il est important de noter qu'étant donné que ce trajet est réel, la vitesse n'est pas parfaitement reproductible entre deux essais. De plus, pour chaque essai réalisé, l'état de charge initial du banc de batteries n'est pas le même, et le courant des accessoires n'est pas rigoureusement identique. Ainsi la comparaison des résultats donne uniquement les tendances.

Les résultats expérimentaux pour le véhicule de référence sont donnés Figure 7-19. Les résultats expérimentaux pour le microbus électrique mixte pour les stratégies à base de « filtrage » et « fonction de l'accélération » sont donnés Figure 7-20 et Figure 7-21. Les distributions de courant pour les deux véhicules pour les deux stratégies de gestion de l'énergie sont données Figure 7-22.

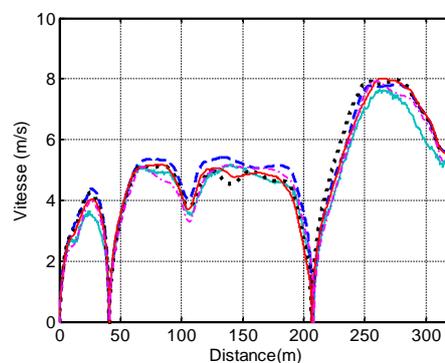


Figure 7-18. Reproductibilité de la vitesse pour les différents essais

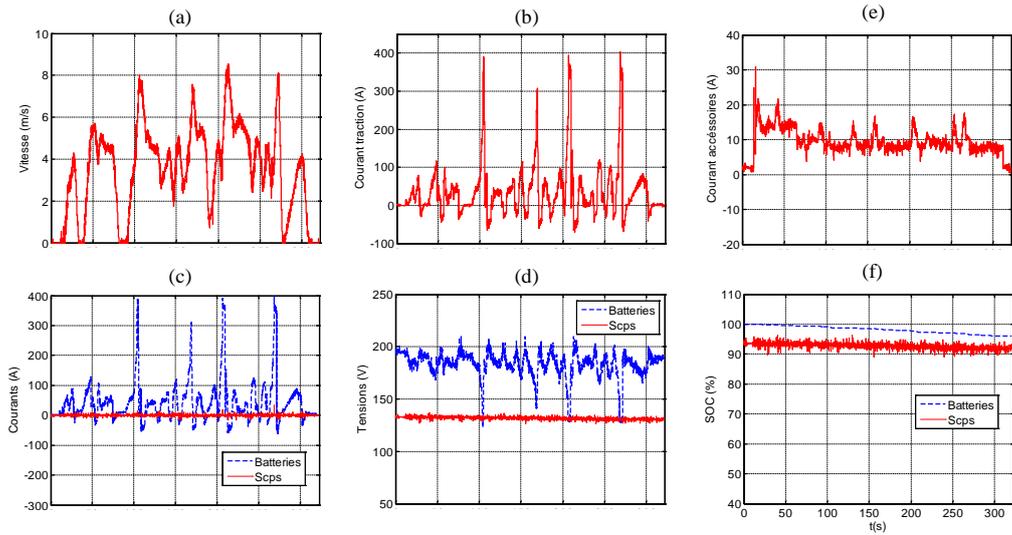


Figure 7-19. Résultats expérimentaux quand seules les batteries sont activées

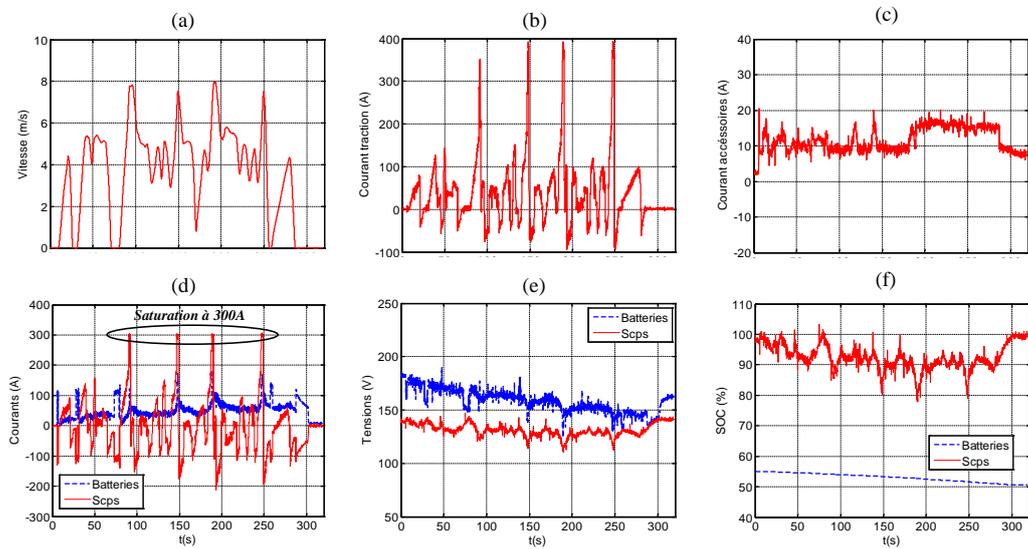


Figure 7-20. Résultats expérimentaux pour la stratégie à base de filtrage

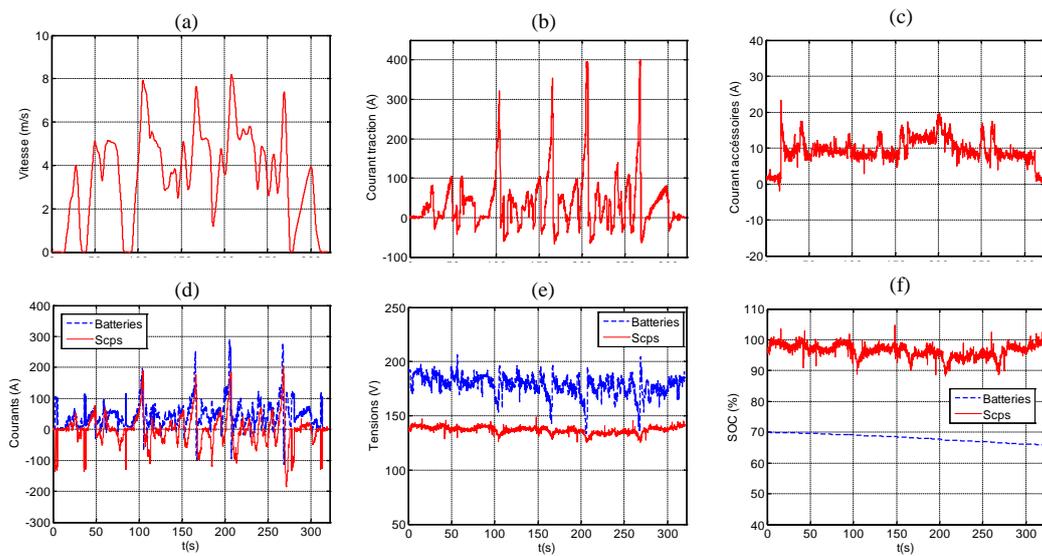
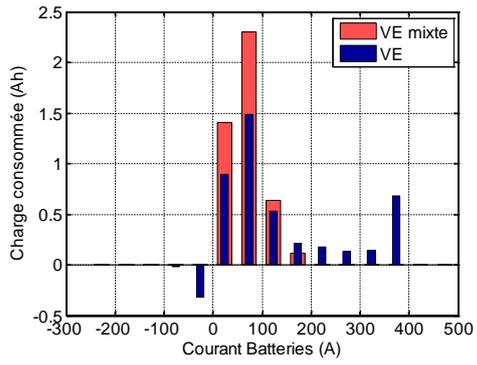
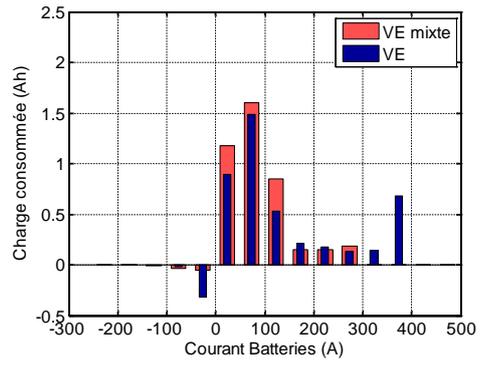


Figure 7-21. Résultats expérimentaux pour la stratégie « fonction de l'accélération »



(c) Stratégie a base « de filtrage »



(b) Stratégie « fonction de l'accélération »

Figure 7-22. Distribution du courant du banc de batteries pour les deux véhicules



## 7.9 Annexe 9 : Couplage de VEHLIB avec un programme de dimensionnement d'ACM

### 7.9.1 Principe

Dans le cadre d'un stage de Master co-encadré avec l'UTC de Compiègne et de l'université Paris-sud11, un programme de dimensionnement d'une Association Convertisseur Machine asynchrone a été couplé à VEHLIB. Après l'identification du cahier des charge de l'espace couple vitesse de l'ACM en utilisant le modèle du véhicule hybride ciblé. La démarche est représentée sur la Figure 7-23.

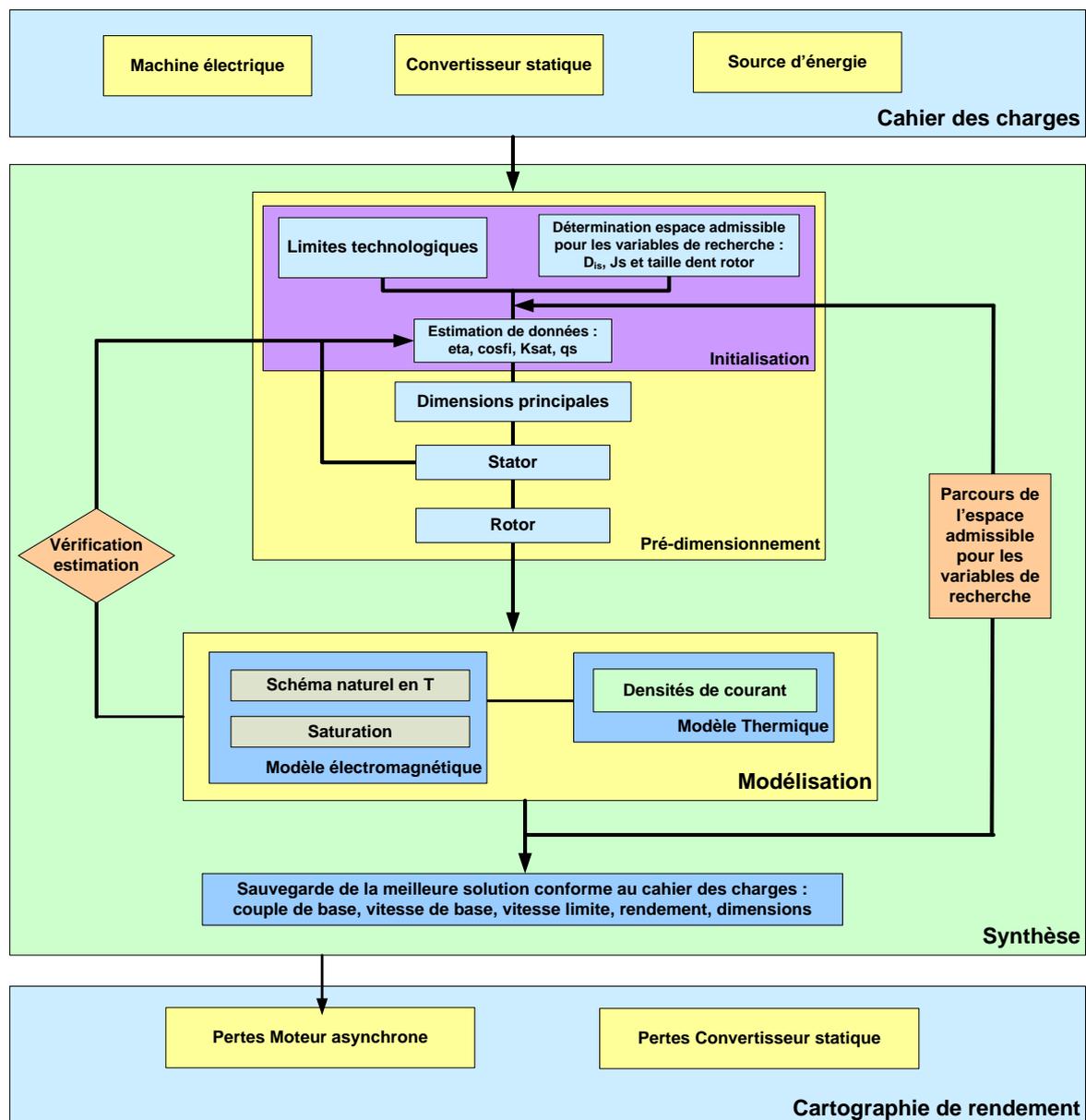


Figure 7-23 : Organigramme de la méthode de dimensionnement de l'ACM

## 7.9.2 Exemple d'application : Dimensionnement d'un Alternodémarrateur intégré

Cette procédure a été appliquée pour le dimensionnement puis la génération de cartographie d'une ACM pour un véhicule hybride parallèle avec machine électrique intégrée au bloc moteur (à la place du Volant d'inertie, voir haut gauche de la Figure 7-24). Une interface permet de rentrer les contraintes de dimensionnement (longueur et diamètre visés) en plus de l'espace couple/vitesse de l'ACM.

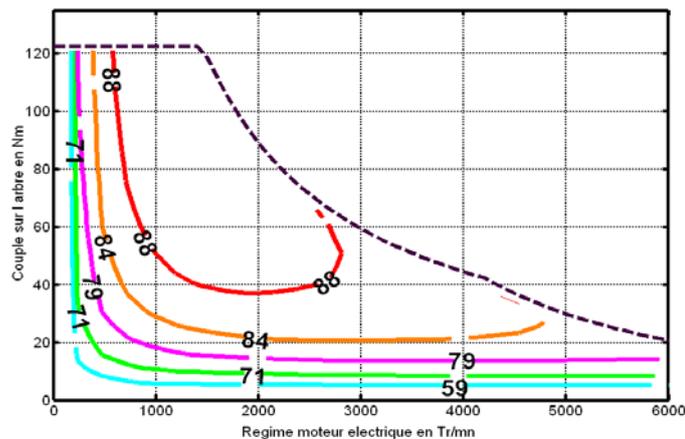
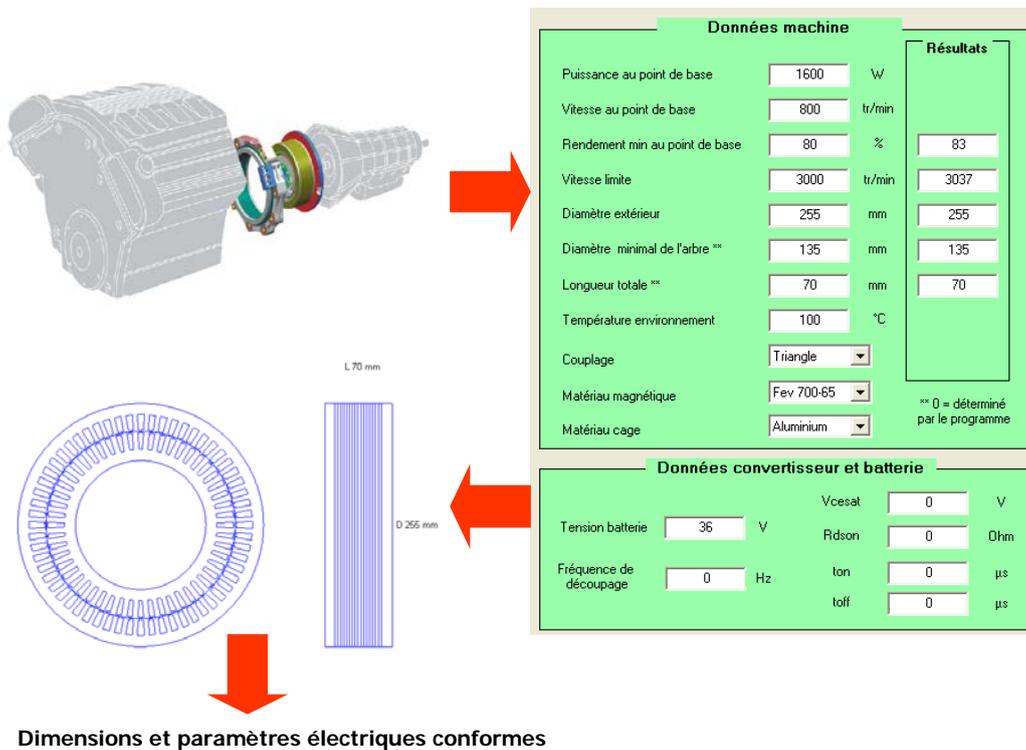


Figure 7-24 : déroulement d'un cas d'application

Le programme permet de générer, moyennant des approximations, les paramètres géométriques, électriques ainsi que la cartographie de l'ACM.

## **8 Bibliographie**



# Bibliographie



- ADEME, 2009, *Energie et climat. Chiffres clés. Edition 2009.*, Ref: 6607: ADEME.
- AEU, 2010. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2008 and inventory report 2010. Available at: ISSN 1725-2237.
- Affleck, W.S. et al., 1977. *fuel economy of the gasoline engine* the Macmillan Press LTD., Hong Kong: D.R. Blackmore & A. Thomas.
- AIE, 2010. *World energy outlooks 2010. Key graphs*, International Energy Agency.
- Akli, C.R. et al., 2007. Energy management and sizing of a hybrid locomotive. In *European Conference on Power Electronics and Applications*. European Conference on Power Electronics and Applications. p. 1-10.
- Allègre, A. L., Bouscayrol, A. & Trigui, R., 2009. Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications. In *IEEE VPPC2009*. IEEE VPPC2009. Dearborn, MI, p. 213-220.
- Allègre, Anne Laure, 2010. *Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1.
- Anderson, D.L., 2009. *An evaluation of current and future costs for Lithium-Ion batteries for use in electrified vehicle powertrains*. Masters Project. Nicholas School of the Environment, Duke University.
- André, M., 1997. *European Development of hybrid technology approaching efficient zero emission mobility (HYZEM)*, INRETS.
- Armoogum, J. et al., 2010. Plus de voyages, plus de kilomètres quotidiens: une tendance à l'homogénéisation des comportements de mobilité des Français, sauf entre ville et campagne. *La mobilité des Français Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*. *La Revue du CGDD*, p.1-224.
- Assanis, D. et al., 1999. Optimization approach to hybrid electric propulsion system design. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 27(4), p.393–421.
- Association Rebis, 2011, Généralités sur l'approche systémique. Available at: <http://jfa04.perso.infonie.fr/gensyst.html> [Consulté mai 6, 2011].
- Astier, S., 2003. *Des machines à aimants permanents aux systèmes énergétiques autonomes. Systémique, électricité et développement durable*. Toulouse: HDR, Institut national polytechnique de Toulouse.

Aubertin, M., Tounzi, A. & Le Menach, Y., 2008. Study of an electromagnetic gearbox involving two permanent magnet synchronous machines using 3-D-FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(11), p.4381–4384.

Azib, T. et al., 2010. An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Source. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(12), p.4024-4031.

## - B -

Badin, F. et al., 1996. Hybrid drive trains evaluation in actual use. In *EVS13*. EVS13. Osaka, Japan.

Badin, F. et al., 2000. SIVTHEC, a research program to evaluate high power batteries ageing in actual use. In *EVS17*. EVS17. Montreal Canada.

Badin, F. et al., 2004. The use of batteries in hybrid vehicles. In *IEEE VPPC2004*. IEEE VPPC2004. Paris, France.

Badin, François, 1997. *Contribution à la modélisation des transmissions hybrides thermiques électriques séries. Réalisation d'un bilan énergie-pollution en usage réel*. Chambéry: HDR, Université de Savoie.

Barre, P.J. et al., 2006. Inversion-based control of electromechanical systems using causal graphical descriptions. In *IEEE-IECON'06*. Paris.

Baumann, B.M. et al., 2000. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 5(1), p.58-71.

Béguery, P., Dubray, A. & Gentil, S., 2001. Optimisation des lois de gestion d'énergie d'un véhicule hybride série. In *Journées Automatique et Automobile*. LAP –ENSEIRB – Université Bordeaux I.

Belt, J.R. et al., 2003. A capacity and power fade study of Li-ion cells during life cycle testing. *Journal of Power Sources*, 123(2), p.241-246.

Beretta, J., 2005. *Génie électrique automobile: la traction électrique*, Hermes Science Publications.

Beretta, J. & Collectif, 2007. *Electronique, électricité et mécatronique automobile*, Hermes Science Publications.

Bernard, J., 2007. *Véhicules hybrides à pile à combustible: dimensionnement et stratégies de commande*. Valenciennes: Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

- Beusen, B. et al., 2009. Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(7), p.514-520.
- Bitsche, O. & Gutmann, G., 2004. Systems for hybrid cars. *Journal of Power Sources*, 127(1-2), p.8-15.
- Boldea, I. & Nasar, A., 2002. *The Induction machine Handbook* CRC Press.,
- Bose, B.K. & Szczesny, P.M., 1988. A microcomputer-based control and simulation of an advanced IPM synchronous machine drive system for electric vehicle propulsion. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 35(4), p.547–559.
- Bossmann, T. et al., 2007. Energetic Macroscopic Representation of a hybrid storage system based on supercapacitors and compressed air. In *IEEE-ISIE'07*. IEEE-ISIE'07. Vigo, Spain.
- Boujelben, M. et al., 2006. Evaluation and optimization of a hybrid urban Microbus. In *Electric and Hybrid Vehicles, 2006. ICEHV '06. IEEE Conference on*. IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles, 2006. ICEHV '06. p. 1-8.
- Boujelben, Majed, 2009. *Etude énergétique et environnementale d'un véhicule hybride en vue de l'optimisation du microbus de GRUAU*. Lyon: Thèse de doctorat, INSA de Lyon.
- Boulon, L., 2009. *Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systemique pour la gestion d'énergie*. Thèse de doctorat, Université de Franche Comté.
- Boulon, L. et al., 2010. Simulation model of a Military HEV with a Highly Redundant Architecture. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), p.2654 - 2663.
- Bouscayrol, A. et al., 2005. Control implementation of a five-leg AC-AC converter to supply a three-phase induction machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(1), p.107-115.
- Bouscayrol, A., 2008. Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives. In *IEEE-ISIE'08*. IEEE-ISIE'08. Cambridge (United Kingdom), p. 2146 – 2151.
- Bouscayrol, A. et al., 2009. Energetic Macroscopic Representation and inversion-based control illustrated on a wind energy conversion systems using Hardware-in-the-loop simulation. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, 56(12), p.4826-4835.
- Bouscayrol, A., 2010. Hardware-in-the- Loop Simulation. In *Industrial Electronics Handbook*. Chicago: Taylor & Francis.
- Bouscayrol, A. et al., 2000. Multimachine Multiconverter System: application for electromechanical drives. *European Physics Journal - Applied Physics*, 10(2), p.131-147.
- Bouscayrol, Alain, 2003. *Formalismes de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines Multiconvertisseurs*. Lille: HDR, Université des Sciences et Technologies de Lille.

- Broussely, M., 2007. Traction Batteries. EV and HEV. In *Industrial Applications of Batteries*. Amsterdam: Elsevier, p. 203-271. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B87NJ-4PPX208-B/2/b9706769f9b6b44b82d037a06dbeebbf> [Consulté avril 5, 2011].
- Buecherl, Dominik, Bolvashenkov, I. & Herzog, H.-G., 2009. Verification of the Optimum Hybridization Factor as Design Parameter of Hybrid Electric Vehicles. In *IEEE VPPC2009*. IEEE VPPC2009. Dearborn, MI.
- Buecherl, D. et al., 2010 Scalability as a degree of freedom in electric drive train simulation. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. p. 1–5.
- Buntin, D.L. & Howze, J.W., 1995. A switching logic controller for a hybrid electric/ICE vehicle. In *American Control Conf.* American Control Conf. Seattle, WA, p. 1169-1175.

- C -

- Çagatay Bayindir, K., Gözükcük, M.A. & Teke, A., 2011. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 52(2), p.1305-1313.
- Caradisiac, 2011, Citroën: la C4 Hybride HDi sous toutes ses coutures. Available at: <http://www.caradisiac.com/Citroen-la-C4-Hybride-HDi-sous-toutes-ses-coutures-643.htm> [Consulté avril 5, 2011d].
- Caron, J.P. & Hautier, J.P., 1995. *Modélisation et commande de la machine asynchrone*, Editions Technip.
- Cartech, 2011, Infiniti M35 hybrid, l'hybride autrement - Cartech.fr. Available at: <http://www.cartech.fr/news/infiniti-m35-hybride-39713554.htm> [Consulté avril 6, 2011e].
- CE, 2009. *Investing in the Development of Low Carbon Technologies (SET-Plan)*, Brussels: Commission of the European Communities.
- Chan C. C. & Chau K. T., 2001, *Modern electric vehicle technology*: Oxford Science publication.
- Chan, C.C., Bouscayrol, A. & Chen, K., 2010. Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles: Architectures and Modeling. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 59(2), p.589-598.
- Chapoulie, P., 1999. *Modélisation systémique pour la conception de véhicules électriques multi-sources. Application aux véhicules équipés de générateurs photovoltaïques ou de supercondensateurs*. Toulouse: Thèse de doctorat, Institut national polytechnique

de Toulouse. Available at: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=198403>  
[Consulté décembre 20, 2010].

- Chen, K., Bouscayrol, A. & Lhomme, W., 2008. Energetic Macroscopic Representation and Inversion-based control: Application to an Electric Vehicle with an electrical differential. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 6(1), p.1097-1102.
- Chen, Keyu et al., 2010. A common model validation in the case of the Toyota Prius II. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.
- Chen, Keyu et al., 2009. Global modeling of different vehicles. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, p.80–89.
- Chen, Keyu, 2010. *Représentation énergétique macroscopique et structure de commande communes pour différents Véhicule électriques et hybrides*. Lille: Thèse de doctorat, Université Lille 1.
- Cheng, Y. et al., 2010. Design of a permanent magnet electric variable transmission for HEV applications. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.
- Cheng, Y. et al., 2009. Global modelling and control strategy simulation for a Hybrid Electric Vehicle using Electrical Variable Transmission. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 4(2), p.73-79.
- Cheng, Y. et al., 2011. Specifications and Design of a PM Electric Variable Transmission for Toyota Prius II. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. to be published.
- Cheng, Y., Van Mierlo, J. & Lataire, P., 2007. Research and test platform for hybrid EV with supercapacitor based energy storage. In *EPE'07*. Allborg (Danemark).
- Cheng, Yuan et al., 2009. Different Structures of Permanent-Magnet Electric Variable Transmissions for Hybrid Electric Vehicles. In *EVS25*. EVS25. Shenzhen, China.
- Chrenko, D. et al., 2010. Modeling and control of fuel cell systems by energetic macroscopic representation. *ASME Journal of Fuel cell science and technology*, 7(1), p.01-11.
- Christoph Romaus, Kai Gathmann & Joachim Böcker, 2010, Optimal Energy Management for a Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles Based on Stochastic Dynamic Programming. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.
- CITEPA, 2009. *Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*, CITEPA.
- CITEPA, 2011, - Principaux phénomènes. Available at:  
<http://www.citepa.org/pollution/phenomenes.htm> [Consulté février 16, 2011c].
- Combes, Emmanuel, Delhomme, M. & Personaz, J., 1998. Parallel Hybrid Traction System and Mechatronic Design. In *Fisita'98*. Fisita'98. Paris.
- Comité des constructeurs Français d'automobile, 2008. *Emission de CO2. Le transport routier mobilisé.*,

- Coquery, G. et al., 2003. High temperature reliability on automotive power modules verified by power cycling tests up to 150°C. *Microelectronics Reliability*, 43(9-11), p.1871-1876.
- Cristian Musardo, Giorgio Rizzoni & Benedetto Staccia, 2005. A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. In *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005*. 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005. Seville, Spain.
- Crolla, D.A. et al., 2008. Controller design for hybrid vehicles – state of the art review. In *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin, China.
- Culioli, J.C., 1994. *Introduction à l'optimisation*, Ellipses.

- D -

- Dauphin-Tanguy, G., 2000. *Les bond graphs*, Paris: Hermès Science.
- Dauphin-Tanguy, G., 1999. Les bond graphs et leur application en mécatronique. In *Technique de l'Ingénieur*. p. 1-24.
- Delprat, S. et al., 2004. Control of a parallel hybrid power train. Optimal control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53(3).
- Delprat, Sébastien, 2002. *Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles*. Valenciennes: Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Desai, C. & Williamson, S.S., 2009. Optimal design of a parallel Hybrid Electric Vehicle using multi-objective genetic algorithms. In *IEEE VPPC2009*. IEEE VPPC2009. Dearborn, MI.
- Desbois-Renaudin, M., Trigui, R. & Scordia, J., 2004. Hybrid powertrain sizing and potential consumption gains. In *IEEE VPPC2004*. IEEE VPPC2004. PARIS, France.
- Djani, Y., Sicard, P. & Bouscayrol, A., 2006. Extension of Energetic Macroscopic Representation to time-varying systems, applications to winder tension control. In *IEEE-ISIE'06*. IEEE-ISIE'06. Montreal, Canada, p. 1370 – 1375.
- Donald E. Kirk, 2004. *Optimal control theory. An introduction* Dover., Mineola, New York: Dover Publications, Inc.
- Dufour, C. & Bélanger, J., 2005. Real-time simulation of a 48-pulse GTO STATCOM compensated power system on a dual-Xeon PC using RT-LAB. In *Proceedings of the 6th International Conference on Power Systems Transients (IPST-05)*.

- E -

- EEA, 2008. *Energy and environment report 2008*, Energy and Environment Agency.
- EEA, 2010. Final energy consumption by sector in the EU-27, 1990-2007 - Maps and graphs — EEA. Available at: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/final-energy-consumption-by-sector> [Consulté mars 1, 2011].
- Ehsani, M., Rahman, K.M. & Toliyat, H.A., 1997. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 44(1), p.19–27.
- Ehsani, Mehrdad et al., 2005. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. Fundamentals, theory, and design*, Boca Raton (USA) CRC Press.
- Elaoud, S., Loukil, T. & Teghem, J., 2007. The Pareto fitness genetic algorithm: Test function study. *European Journal of Operational Research*, 177(3), p.1703-1719.
- Emadi, A. et al., 2005. Topological overview of Hybrid Electric and Fuel Cell vehicular power systems architectures and configurations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(3), p.763-770.
- Erdinc, O., Vural, B. & Uzunoglu, M., 2009. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system. *Journal of Power Sources*, 194(1), p.369-380.
- Ericsson, E., 2001. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(5), p.325-345.
- European community, 2007. Results of the review of the Community Strategy to reduce CO2 emissions from passenger cars and light-commercial vehicles.

- F -

- Faiz, J. & Moayed-Zadeh, K., 2005. Design of switched reluctance machine for starter/generator of hybrid electric vehicle. *Electric Power Systems Research*, 75(2-3), p.153-160.
- Fellini, R. et al., EcoDesign'99. Optimal design of automotive hybrid powertrain systems. In *EcoDesign'99*. p. 400–405.

Filippa, M. et al., 2005. Modeling a hybrid electric vehicle powertrain test cell using Bond Graph. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(3), p.835-845.

Foggia, A., Sabonnadiere, J.C. & Silvester, P., 1975. Finite element solution of saturated travelling magnetic field problems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 94(3), p.866- 871.

Fréry, F., 2000. Un cas d'amnésie stratégique. L'éternelle émergence de la voiture électrique. In IXème Conférence Internationale de Management Stratégique. Montpellier.

- G -

Gaines, L. & Cuenca, R., 2000. *Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles*, Chicago: Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory.

Gandanegara, G. et al., 2005. Bond Graph based Stability Analysis of a Railway Traction System. *EPE Journal*, 15(2).

Gauchia, L., 2009. *Nonlinear dynamic per-unit models for electrochemical energy systems. Application to a hardware-in-the-loop hybrid simulation*. Phd thesis, University of Carlos III, Madrid.

Gawthrop, P.J. & Bevan, G.P., 2007. Bond Graph modeling, a tutorial introduction for control engineers. *IEEE Control Systems magazine*, 27(2), p.24-45.

Geitner, G.-H., 2010. The Bond Graph – an excellent modelling tool to study abstraction level and structure comparison. In IEEE VPPC2010. Lille, France.

Geller, B., Quinn, C. & Bradley, T.H., 2010. Analysis of Design Tradeoffs for Plug-in Hybrid Vehicles. In *Electric and Hybrid Vehicles*. Amsterdam: Elsevier, p. 159-191.  
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6MG2-50GM5N7-4/2/af45b18e0a6ed84049c0b41f34f3fdf4> [Consulté avril 5, 2011].

GIEC, 2007. Changements climatiques 2007: rapport de synthèse.

Giraud, F., Semail, B. & Audren, J.T., 2004. Analysis and phase control of a piezoelectric traveling-wave ultrasonic motor for haptic stick application. *IEEE Trans on Industry Applications*, 40(6), p.1541 – 1549.

Gurkaynak, Y., Khaligh, A. & Emadi, Ali, 2009. State of the Art Power Management Algorithms for Hybrid Electric Vehicles. In *IEEE VPPC2009*. IEEE VPPC2009. Dearborn, MI.

Guzzella, L. & Sciarretta, A., 2004. *Fuel optimal trajectories of fuel cell vehicles.*, Bergeggi.

Guzzella, Lino & Sciarretta, Antonio, 2008. *Vehicle Propulsion Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at: <http://www.springerlink.com/content/978-3-540-74691-1#section=353068&page=1&locus=83> [Consulté avril 14, 2011].

- H -

Hamet, J.-F. et al., 2010. New vehicle noise emission for French traffic noise prediction. *Applied Acoustics*, p.861-869.

Hasanzadeh, A., Asaei, B. & Emadi, A., 2005. Optimum design of series hybrid electric buses by genetic algorithm. In *Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005. Proceedings of the IEEE International Symposium on*. p. 1465–1470.

Hautier, J.P. & Caron, J.P., 1999. *Convertisseurs statiques: méthodologie causale de modélisation et de commande*, Paris (France): Editions Technip.

Hautier, J.P. & Faucher, J., 1996. Le graphe informationnel causal. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 90, p.167-189.

Hoeijmakers, M.J. & Ferreira, J.A., 2006a. The electric variable transmission. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 42 (4), p.1092-1098.

Hoeijmakers, M.J. & Ferreira, J.A., 2006b. The electric variable transmission. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 42 (4), p.1092-1100.

Hofman, T. et al., 2007. Rule-Based Equivalent Fuel Consumption Minimization Strategies for Hybrid Vehicles. In *17th IFAC World Congress*. 17th IFAC World Congress.

Holder, C. & Gover, J., 2006. Optimizing the hybridization factor for a parallel hybrid electric small car. In *IEEE VPPC2006*. IEEE VPPC2006. Windsor, UK.

Huang, S. et al., 1998. A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines. *IEEE transaction on Industry Applications*, 34 (1), p.92-97.

- I -

INNEEL & DOE, 2003. *FreedomCAR Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicle.*,

Iwasaki, I. & Simon, H.A., 1994. Causality and model abstraction. In *Artificial Intelligence*. p. 143-194.

- J -

- Jaafar, A. et al., 2009. Sizing and Energy Management of a Hybrid Locomotive Based on Flywheel and Accumulators. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(8), p.3947-3958.
- Jaafar, A. et al., 2010. Sizing of a hybrid locomotive based on accumulators and ultracapacitors. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.
- Jeanneret, B. et al., 2004. Mise en oeuvre d'une commande temps réel de transmission hybride sur banc d'essai moteur. In *SIA'04*. SIA'04. Poitiers, France.
- Jeanneret, B. et al., 1999. New Hybrid concept simulation tools, evaluation on the Toyota Prius car. In *EVS16*. EVS16. Beijing – China.
- Jeanneret, B. & Harel, F., 1999. *Rapport d'évaluation du véhicule Toyota PRIUS*, LTE99-25, INRETS.
- Jeuvey, J. et al., 2009. Fuel cell system integration on a heavy-duty vehicle and development of a control strategy with real time simulation. In *IEEE VPPC2009*. IEEE VPPC2009. Dearborn, MI.
- Johannesson, L., Asbogard, M. & B. Egart, B., 2005. Assessing the potential of predictive control for hybrid vehicle powertrains using stochastic dynamic programming. In *Intelligent Transportation Systems*.
- Joumard, R., 2002. Enjeux de la pollution de l'air et des transports. In *5<sup>ème</sup> colloque C-VELEC*. 5<sup>ème</sup> colloque C-VELEC. Grenoble.

- K -

- Kalhammer, F.R. et al., 2007. *Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology*, Sacramento, California: State of California Air Resources Board.
- Karen L. Butler, Mehrdad Ehsani & Preyas Kamath, 1999. A Matlab-Based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle Design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48 (6).
- Karnopp, D., Margolis, D.L. & Rosenberg, R.C., 1990. *Systems dynamics: A Unified Approach*. second edition., New York: Wiley-Interscience.

- Kermani, S., 2009. *Gestion énergétique des véhicules hybrides: de la simulation à la commande temps réel*. Valenciennes: Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.
- Kermani, S. et al., 2011. PHIL Implementation of Energy Management Optimization for a Parallel HEV on a Predefined Route. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(3), p.782-792.
- Kessel, J., 2006. *Energy Management for Automotive Power Nets*. Eindhoven: Phd thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- Kim, N. et al., 2006. Parametric Design of a Two-mode hybrid powertrain. In EVS22. Yokohama, Japan.
- Kimura, A., Abe, T. & Sasaki, S., 1999. Drive force control of a parallel-series hybrid system. *JSAE Review*, 20 (3), p.337–341.
- Knoke, T. & Böcker, J., 2007. Optimal Power Train Design of a Hybrid Refuse Collector Vehicle. In *IEEE VPPC2007*. IEEE VPPC2007. Arlington, Texas.
- Kuriyama, M., Yamamoto, S. & Miyatake, M., 2010. Theoretical study on Eco-Driving Technique for an Electric Vehicle with Dynamic Programming. In *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). p. 2026-2030.

- L -

- Lambert, J. & Philips-Bertin, C., 2009. *les nuisances environnementales des transports: résultats d'une enquête nationale*, Les collections de l'INRETS.
- Langari, Reza & Won, J.-S., 2005. Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle—Part I: System Architecture and Design of the Driving Situation Identification Process. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), p.837-845.
- Langlois, O. et al., 2005. Bond Graph Modeling of an Electro-Hydrostatic Actuator for Aeronautic Applications. In *IMACS World Congress, Paris*.
- Lee, H.D. & Sul, S.K., 1998. Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 45 (4), p.625-632.
- Legranger, J., 2005. *Génération des paramètres électriques et des pertes d'un moteur asynchrone pour la simulation de véhicules hybrides*, Stage Master, UTC-ENSC-INRETS.
- Legranger, J. et al., 2006, Integration of an Induction Machine Synthesis in a Multiphysics Simulation Tool for Automotive Applications. ICEM 2006

- Lescot, J. et al., 2010. On the integration of optimal energy management and thermal management of hybrid electric vehicles. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.
- Letrouve, T., Delarue, P. & Bouscayrol, A., 2009. Modelling and control of a double parallel hybrid electric vehicle using Energetic Macroscopic Representation. In *ELECTROMOTION'09*. ELECTROMOTION'09. Lille (France).
- Lhomme, W. et al., 2011. Inversion-based control of a vehicle with a clutch using a switched causal modelling. *International Journal of Systems Science*, Vol. 42(No. 2), p.319–334.
- Lhomme, W., Bouscayrol, A. & P. Barrade, 2004. Simulation of series hybrid electric vehicles based on Energetic Macroscopic Representation. In IEEE-ISIE'04. Ajaxio, France.
- Lhomme, Walter, 2007. *Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique*. Lille: Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille. Available at: zotero://attachment/248/ [Consulté décembre 20, 2010].
- Lhomme, Walter et al., 2008. Switched Causal Modeling of Transmission With Clutch in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 57 (4), p.2081–2088.
- Li, C.-Y. & Liu, G.-P., 2009. Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 192 (2), p.525-533.
- Li, H. et al., 2006. Development of a unified design, test, and research platform for wind energy systems based on hardware-in-the-loop real time simulation. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, 53 (4), p.1144-1151.
- Lin, C.C. et al., 2003. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *IEEE Trans. Cont. Syst. Technol.*, 11 (6), p.839–849.
- Lino Guzzella & Mois Amstutz, 1999. CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48(6), p.1762-1769.
- Lockheedmartin, 2011, Lockheed Martin to apply experience in hybrid vehicles as research partner in 21st Century Truck Initiative. Available at: [http://www.lockheedmartin.com/news/press\\_releases/2000/LockheedMartinApplyExperienceInHybr.html](http://www.lockheedmartin.com/news/press_releases/2000/LockheedMartinApplyExperienceInHybr.html) [Consulté avril 5, 2011f].
- Louati, S., 2009. *Les émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie dans le monde en 2006*, Lettre n° 7: Commissariat général au développement durable.

- M -

- MacLean, H.L. & Lave, L.B., 2003. Life Cycle Assessment of Automobile/Fuel Options. *Environmental Science & Technology*, 37 (23), p.5445-5452.
- Marco Amrhein & Philip T. Krein, 2005. Dynamic Simulation for Analysis of Hybrid Electric Vehicle System and Subsystem Interactions Including Power Electronics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), p.825-836.
- Markel, T. et al., 2002. Advisor. A systems Analysis Tool for Advanced Vehicle Modeling. *Journal of Power Sources*.
- Marquis-Favre, W., Bideaux, E., Mechin, O., et al., 2006. Mechatronic bond graph modelling of an automotive vehicle. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences*, 12(2), p.189.
- Marquis-Favre, W., Bideaux, E. & Scavarda, S., 2006. A planar mechanical library in the AMESim simulation software. Part I: Formulation of dynamics equations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14 (1), p.25-46.
- Messagie, M. et al., 2010. Life Cycle Assessment of conventional and alternative small passenger vehicles in Belgium. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.
- Michiel Koot et al., 2005. Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (3), p.771-782.
- Miller, J.R. & Burke, A.F., 2008. Electrochemical capacitors: challenges and opportunities for real-world applications. *Electrochemical Society Interface*, 17 (1), p.53-57.
- Mohammadian, M. & Bathaee, M.T., 2004. Motion control for hybrid electric vehicle. In *International Power Electronics and Motion Control Conference*. International Power Electronics and Motion Control Conference. p. 1490-1494.
- Montaru, M. & Pelissier, S., 2008. Frequency and Temporal Identification of a Li-ion Polymer Battery Model Using Fractional Impedance. In *IFP Advanced in Hybrid Powertrains*. IFP Advanced in Hybrid Powertrains. Reuil-Malmaison.
- Montaru, Maxime, 2009. *Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*. Bron: Thèse de doctorat, INP Grenoble.
- Morchoine, A. & Vidalenc, E., 2009. *Enjeux, consommations électriques, émissions CO2 des transports électriques à l'horizon 2020 - 2030*, Rapport ADEME.

Moreno, J., Dixon, J. & Ortuzar, M., 2006. Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53 (2), p.614- 623.

Munteanu, I. et al., 2010. Hardware-in-the-Loop-based Simulator for a Class of Variable-speed Wind Energy Conversion Systems: Design and Performance Assessment. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25 (2), p.564-576.

- N -

Nakagawa, A., Kawaguchi, Y. & Nakamura, K., 2008. Silicon limit electrical characteristics of power devices and Ics. *IET Seminar Digests*, 2008 (2), p.25-32.

- O -

Ogden, J.M., Williams, R.H. & Larson, E.D., 2004. Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines. *Energy Policy*, 32(1), p.7-27.

Oh, S.C., 2005. Evaluation of motor characteristics for hybrid electric vehicles using the HIL concept. *IEEE transaction on vehicular technology*, 54 (3).

Oh, S.C. & Emadi, A., 2004. Test and simulation of Axial Flux Motor Characteristics for Hybrid EVs. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 53(3), p.912-919.

Otter, M., Elmqvist, H. & Cellier, F.E., 1996. Modeling of multibody systems with the object-oriented modeling language Dymola. *Nonlinear Dynamics*, 9(1), p.91–112.

- P -

Paganelli, G. et al., 2000. Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car. *J. of automobile engineering ImechE, IEE*, (214), p.705-718.

Paynter H. M., 1960. *Analysis and design of engineering systems.*, Cambridge (United Kingdom): The MIT Press.

Pelissier, S., 2010. Les Batteries pour les transports terrestres. Etat de l'art et perspectives. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.

- Perez, S., 2010. *Etude paramétrique de différentes architectures de véhicules hybrides thermique-électrique*, Rapport LTE1017, INRETS.
- Pertusa, C., 1996. *Contribution à la définition de moteurs à aimants permanents pour un véhicule électrique hybride routier*. Toulouse: Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse.
- Peters, J., 2010. *Caractérisation et modélisation de batteries Lithium pour véhicules hybrides et électriques*, Stage Master: LTE1015, INRETS.
- Pillot, D., 2010. Carburants alternatifs. Eléments de comparaisons. In Colloque Rhône Alpes Energie. Lyon.
- Ping Zheng et al., 2007. Magnetic Coupling Analysis of Four-Quadrant Transducer Used for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6), p.2597-2599.
- Piquet, H., Foch, H. & Demni, H.E., 2000. Une méthode de conception en électronique de puissance, à l'aide d'éléments caractérisés. In *Electronique de Puissance du Futur*. Electronique de Puissance du Futur. Lille.
- Plett, G.L., 2004. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1. Background. *Journal of Power Sources*, 134(2), p.252-261.
- Poursamad, A. & Montazeri, M., 2008. Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 16(7), p.861-873.
- Prokhorov, D.V., 2008. Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics. *Neural Networks*, 21(2-3), p.458-465.
- PSA, 2011, Auto-innovations: Peugeot 3008 HYbrid4, premier hybride du groupe PSA. Available at: <http://www.auto-innovations.com/actualite/1333.html> [Consulté avril 5, 2011a].

- R -

- Rajagopalan, A. et al., 2003. *Development of fuzzy logic control and advanced emissions modelling for parallel hybrid vehicles*, NREL/SR-540-32919: NREL Tech. Report.
- de Rosnay, J., 1975. *Le microscope, vers une vision globale* Points., Seuil.
- Rousseau, A. & Pasquier, M., 2001. Validation Process of a System Analysis Model: PSAT. In *SAE paper 01P-183*. SAE World Congress. Detroit.

- Salmasi, F.R., 2007. Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles. Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(5), p.2393 - 2404.
- Samaras, C. & Meisterling, K., 2008. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environmental Science & Technology*, 42(9), p.3170-3176.
- Santa, J., Gómez-Skarmeta, A.F. & Sánchez-Artigas, M., 2008. Architecture and evaluation of a unified V2V and V2I communication system based on cellular networks. *Computer Communications*, 31(12), p.2850-2861.
- Sartorelli, G., Miller, J.M. & Auer, J., 2007, Ultracapacitors – improving energy storage for hybrid vehicles. *EET2007 European EleDrive Conference*.
- D. Sauvat, 2003. Principes généraux de la systémique.
- Schwarz, V. & Gindroz, B., 2005. *Le stockage électrochimique*, Dossier Stockage de l'Énergie: MINES-ENERGIE.
- Scordia, J. et al., 2005. Global optimisation of energy management laws in hybrid vehicles using dynamic programming. *International Journal of vehicle Design*, Vol. 39(No. 4), p.349–367.
- Scordia, Julien, 2004. *Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides*. Nancy: Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy1.
- Scordia, Julien et al., 2009. Global Approach for Hybrid Vehicle Optimal Control. *Journal of Asian Electric Vehicles*, Volume 7(Number 1.), p.1–10.
- Scordia, Julien, Desbois-Renaudin, Matthieu & Trigui, Rochdi, 2004. Hybrid powertrain sizing and potential consumption gains. In VPPC2004. Paris.
- Seiler, J. & Schröder, D., 1998. Hybrid vehicle operating strategies. In *EVS15*. EVS15. Brussels, Belgium.
- Steurer, M., 2006. PEBB based high-power hardware-in-loop simulation facility for electric power systems. In *Power Engineering Society General Meeting*.
- Sundström, O., Guzzella, L. & Soltic, P., 2008. Optimal hybridization in two parallel hybrid electric vehicles using dynamic programming. In *17th IFAC World Congress*. p. 4642–4647.

Sundstrom, O., Guzzella, L. & Sundstrom, P.S., 2008. Optimal Hybridization in Two Parallel Hybrid Electric Vehicles using Dynamic Programming. In *17th World Congress of the International Federation of Automatic Control*. 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea.

- T -

Theoildrum, 2011, The Oil Drum | Peak Oil Update - July 2009: Production Forecasts and EIA Oil Production Numbers. Available at: <http://www.theoildrum.com/node/5521> [Consulté mars 2, 2011h].

Trigui, R. et al., 2004. Global Forward-Backward Approach for a Systematic Analysis and Implementation of Hybrid Vehicle Management Laws. Application to a Two Clutches Parallel Hybrid Power Train. In *EET'04*. EET'04. Estoril, Portugal.

Trigui, R. et al., 2003. Hybrid light duty vehicles evaluation program. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4(No. 2), p.65–75.

Trigui, R., Harel, F. & Scordia, J., 2001. Implementation and Comparison of Three Approaches for Energy- Optimized Strategies of a Synchronous Machine and its Inverter. In *EPE'01*. EPE'01. Graz, Austria.

Trigui, R., Vinot, E. & Boujelben, M., 2009. Offline Optimization for Components Sizing and analysis of a Plug-in Hybrid Urban Microbus.

Trigui, Rcodhi et al., 2004. Global Forward-Backward Approach for a Systematic Analysis and Implementation of Hybrid Vehicle Management Laws. Application to a Two Clutches Parallel Hybrid Power Train. In *EET2004*. Estoril, Portugal.

Trigui, Rochdi, 1997. *Motorisation asynchrone pour véhicules électriques. Modélisation, optimisation et évaluation*. Thèse de doctorat. Nancy: Institut Polytechnique de Lorraine.

Trigui, Rochdi et al., 2009. Performance Comparison of Three Storage Systems for Mild HEVs Using PHIL Simulation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VOL. 58(No. 8), p.3959–3969.

Trigui, Rochdi, Jeanneret, Bruno & Badin, Francois, 2004. Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques. Construction de la bibliothèque de modèles VEHLIB. *Recherche Transports Sécurité*, (83), p.129–150.

Turker, H., Bacha, S. & Chatroux, D., 2010. Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) on the French electric grid. In *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES. p. 1-8.

- Valeo, 2011, Publications. Available at: <http://www.valeo.com/en/publications.html> [Consulté avril 5, 2011g].
- Van Keulen, T. et al., 2010. Velocity trajectory optimization in Hybrid Electric trucks. In *American Control Conference (ACC)*. American Control Conference (ACC). p. 5074-5079.
- Van Mierlo, J., Maggetto, G, et al., 2004. Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218 (1), p.43-50.
- Van Mierlo, J., Van den Bossche, P. & Maggetto, Gaston, 2004. Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators. *Journal of Power Sources*, 128(1), p.76-89.
- Van Mierlo, J. & Maggetto, G., 1999. Innovative Iteration Algorithm for a Vehicle Simulation Program. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48(6), p.401-412.
- Vassent, E. et al., 1991. Simulation of induction machine operation using a step by step finite element method coupled with circuits and mechanical equations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 27(6), p.5232-5234.
- Verhille, J.N. et al., 2007. Hardware-in-the-loop simulation of the traction system of an automatic subway. In *EPE'07*. EPE'07. Allborg (Danemark).
- Vinot, E. et al., 2006. *Projet EVALVH: Evaluation du véhicule hybride Toyota PRIUS 2004 et de ses composants.*, LTE06-26, INRETS.
- Vinot, E., Trigui, R. & Jeanneret, B., 2010. Optimal management of electric vehicles with a hybrid storage system. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.
- Vinot, Emmanuel et al., 2008. Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius. *Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing*, Vol. 3(No. 3), p.139-167.
- Vinot, Emmanuel, Trigui, Rochdi & Jeanneret, Bruno, 2010. Optimal Management of Electric Vehicles with a Hybrid Storage System. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.

- W -

- Weimin Li et al., 2007. A Hybrid Controller Design For Parallel Hybrid Electric Vehicle. In *IEEE International Conference on Integration Technology, ICIT '07*. IEEE International Conference on Integration Technology ICIT '07. p. 450-454.
- Wikipedia, 2011, Chevrolet Volt - Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet\\_Volt](http://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Volt) [Consulté avril 5, 2011b].
- Won, J.S. & Langari, R., 2002. Fuzzy torque distribution control for a parallel hybrid vehicle. *Expert Syst.: Int. J. Knowl. Eng. Neural Netw*, 19(1), p.4-10.
- Won, J.-S. & Langari, Reza, 2005. Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle Part II: Torque Distribution, Charge Sustenance Strategies, and Performance Results. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(3), p.837-845.
- Wrightbus, 2011, The Wright Group. Available at: <http://www.wrightbus.com/site/default.asp?CATID=33> [Consulté avril 5, 2011i].
- Wu, Z. et al., 2009. Electrical Motor Design for Hybrid Heavy-Duty Electrical Powertrain. In *IEEE VPPC2009*. IEEE VPPC2009. Dearborn, MI.

- X -

- Xiaoming, W. et al., 2006. Development and research on Hardware-in-the loop Simulation System for HEV Powertrain. *Automotive Engineering*, 3, p.221-224.
- Xu, L. & Zhang, Y., 2006. Design and Evaluation of a Dual Mechanical Port Machine and System. In *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International*. Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International. p. 1-5.

- Y -

- Yoshida, Y. et al., 2003. Comprehensive comparison of efficiency and CO<sub>2</sub> emissions between biomass energy conversion technologies--position of supercritical water gasification in biomass technologies. *Biomass and Bioenergy*, 25(3), p.257-272.

Yusuf Gurkaynak, Alireza Khaligh & Ali Emadi, 2010. Neural Adaptive Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles with Parallel Powertrain. In IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Lille, France.

- Z -

Zanasi, R., 1996. Power-oriented graphs for modeling electrical machines. In *MELECON'96*. Electrotechnical Conference. p. 1211-1214.

Zanasi, R. & Grossi, F., 2010. Modeling and Control of Power-Split Hybrid Electric Vehicles. In *IEEE VPPC2010*. IEEE VPPC2010. Lille, France.

Zeroual, T. & Meunier, C., 2006. Transport durable et développement économique. *Développement durable et territoires*. Available at: <http://developpementdurable.revues.org/3305> [Consulté juin 14, 2011].

Zhang, B. et al., 2009. Multi-objective Parameter Optimization of a Series Hybrid Electric Vehicle Using Evolutionary Algorithms. In *IEEE VPPC2009*. IEEE VPPC2009. Dearborn, MI.

Zhang, X. et al., 2008. Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor. *Journal of Power Sources*, 185(2), p.1533-1543.

## ***9 CV et liste des publications***



## Fiche de synthèse des activités et publications

Rochdi TRIGUI - INRETS LTE

### 1 - Publications

Articles	
Revue Internationales	10
Revue Nationales	5
Congrès internationaux avec actes	33
Conférences invitées	2
Rapports de recherche	
Rapports de recherche sur convention-contrat	15

### 2 – Encadrement, Enseignement

Doctorants, étudiants et jurys de thèse	
Co-Encadrement de <b>doctorants</b>	3
Co-Encadrement d'étudiants en <b>DEA /MASTER et autre</b>	10
Participation à des <b>jurys de thèse</b>	7
Enseignement	
Niveau master et école d'ingénieurs	~20h/an

### 3 - Expérience professionnelle

Depuis 2008	Responsable de l'équipe de recherche Véhicules Electriques et Hybrides du LTE.
Depuis 1998	Chargé de Recherches au LTE de l'INRETS à Bron
1997 - 1998	Chargé de recherches contractuel à la direction de la Recherche de Peugeot SA à Vélizy.
1994 - 1997	Doctorant à l'INRETS

### 4 - Formation

Juin 1997	<b>Docteur Ingénieur</b> en Génie électrique de l'Institut National Polytechnique de Lorraine
Septembre 1993	<b>DEA Procédés et Traitement de l'énergie Electrique de l'Institut National Polytechnique de Lorraine</b>
Juin 1993	Diplôme d' <b>Ingénieur</b> en Génie électrique de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy.

### 5 – Rayonnement Scientifique

Depuis 2005	Membre <b>co-fondateur</b> du réseau National <b>MEGEVH</b> (Modélisation Energétique et Gestion de l'Energie des Véhicules Hybrides)
Depuis 2006	Membre du comité scientifique de la conférence internationale <b>IEEE Vehicle Power and Propulsion (VPPC)</b> .
Sept 2010	<b>Co-president</b> de la conférence IEEE VPPC 2010 à <b>Lille</b> .
Depuis 2010	<b>Co-éditeur</b> de la revue <i>Journal of Asian Electric Vehicles</i>
Sept 2011	<b>Editeur invité</b> de section spéciale de IEEE Transactions on Vehicular Technology.



# Curriculum Vitae

**Nom** : TRIGUI  
**Prénom** : Rochdi  
41 ans, Marié, 3 enfants.

Tel : 04 72 14 25 05  
Mobile : 06 76 90 28 00  
E-mail : [rochdi.trigui@ifsttar.fr](mailto:rochdi.trigui@ifsttar.fr)

## Activité de Recherche

*Depuis Jan. 2008* Chargé de recherches. **Responsable** de l'équipe de recherche **Véhicules Electriques** et **Hybrides** (VEH) du Laboratoire Transport et Environnement (LTE) de l'INRETS à Bron.

*Août 1998* Chargé de **recherches** dans l'équipe VEH du LTE.

- Modélisation et gestion optimale de l'énergie dans les véhicules électrique et hybrides.
- Application **Temps réel** de véhicules hybrides semi virtuel (Hardware In the Loop)
- Test de véhicule sur banc à rouleaux pour validation de modèle. Développement de méthodologies et instrumentations spécifiques.
- Contribution à la conception de commande optimisée en énergie d'un moteur synchrone à rotor bobiné. Validation sur banc d'essai.
- Responsabilité et participation à des projets **Predit**, **ANR** et en partenariat **industriel**.

*De Juill. 97 à Juill. 98* Chercheur contractuel à la Direction des Recherches et des Affaires Scientifiques, unité de Recherche Véhicules Électriques de **Peugeot S.A.** à Vélizy. Thème de recherche : Electrification des auxiliaires dans les véhicules hybrides. Modélisation et étude comparative.

*De 1994 à 1997* Doctorant en génie électrique entre le Laboratoire Energie Nuisance de l'INRETS et le **GREEN** de Nancy. Thème de recherche : modélisation, optimisation et évaluation de **motorisation** asynchrone pour véhicules **électriques**.

*1995/96* Chargé de TP en électrotechnique à l'IUT B de Villeurbanne.

## Formation

*Juin 1997* **Doctorat** de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Spécialité Génie électrique. Intitulé : « Motorisation asynchrone pour véhicules électriques. Modélisation, optimisation et évaluation ».

*Septembre 1993* Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.) : « Procédés et traitements de l'énergie électrique » à Nancy.

*Juin 1993* Diplôme d'**ingénieur** de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy (**ENSEM**). Spécialité électronique de puissance et de commande.

*Décembre 1992* Diplôme d'**Anglais** « First Certificate in English » de l'université de **Cambridge**.

*Juin 1991* Diplôme de licence de **mécanique** de l'université de Nancy I.

De 1987 à 1990 Etudes préparatoires Math-sup Math-spé au lycée St Louis à Paris.

Formation continue Cours d'**Anglais** pour maintien à niveau : une demi journée par quinzaine pendant 3 ans (1999-2002).

### Valorisation Scientifique

- Auteur et co-auteur de **13 publications** dans des revues nationales et internationales, de **19 rapports de recherches**, et de plus de **40 communications dans des congrès** (voir liste des publications),
- Co-Concepteur de la Bibliothèque de composants pour **simulation énergétique de véhicules (VEHLIB)**,
- Co-Concepteur du logiciel SIVTHEC pour la simulation de TC Electrique, Hybride ou Bi-modes.

### Encadrement

- Co-Encadrement de **3 thèses** soutenues et d'**une** en cours.
- Co-Encadrement de **10** stages de DEA, MASTER ou fin d'étude ingénieur depuis 1994
- Membre de **Jury** de **7 thèses**
- Accueil et suivi de doctorants dans le cadre du réseau **MEGEVH** (voir plus bas).

### Autres Activités

- **Enseignement** : Cours annuels sur les véhicules **électriques et hybrides** et la **gestion de l'énergie** embarquée dans 6 universités et écoles d'ingénieurs dont l'**Université Lille1**.
- **Expertise** en véhicules électriques et hybrides : référé de revues à comité de lecture (IEEE TVT et CST). Examen de projets ANR, ADEME et région Franche Comté.

### Rayonnement Scientifique

- Membre **co-fondateur** du réseau National **MEGEVH** (Modélisation Energétique et Gestion de l'Energie des Véhicules Hybrides). <http://12ep.univ-lille1.fr/megevh/>
- Membre du conseil scientifique du pôle de compétitivité **MTA** (Poitiers) 2008-2009.
- Membre du comité scientifique de la conférence internationale IEEE Vehicle Power and Propulsion (**VPPC**).
- Membre du comité scientifique de la conférence nationale EF (Electrotechnique du Futur).
- **Co-président** de la conférence IEEE VPPC 2010 à Lille. <http://vppc2010.univ-lille1.fr/>
- Depuis Août 2010 : **Co-éditeur** de la revue *Journal of Asian Electric Vehicles*. <http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jaev>
- **Editeur invité** d'une section spéciale "Advanced transportation systems" dans IEEE Transactions on Vehicular Technology (à paraître en september 2011)

## LISTE DES PUBLICATIONS

Rochdi TRIGUI, Laboratoire Transport et Environnement. IFSTTAR.

### Revue à comité de lecture

#### Revue internationale

- [RI-1] **R. Trigui**, F. Badin, B. Jeanneret, F. Harel, G. Coquery, R. Lallemand, J.P.Ousten, M. Castagné, M. Debest, E. Gittard, F. Vangraefshepe, V. Morel, J. Labbé, L. Baghli, A. Rezzoug, S. Biscaglia (2003) Hybrid light duty vehicles evaluation program. *International Journal of Automotive Technology* Vol 4 N°2, June 2003. pp 65-75. (in collaboration with GREEN, IFP, ARMINES)
- [RI-2] J. Scordia, Desbois Renaudin M., **R. Trigui**, B. Jeanneret, F. Badin (2005) Global optimization of energy management laws in hybrid vehicles using graph theory. *International Journal of Vehicle Design*. Vol 39, No4 2005. pp 349-367.
- [RI-3] W. Lhomme , **R. Trigui**, P. Delarue, B. Jeanneret, A. Bouscayrol, F. Badin (2008) Switched Causal Modelling of Transmission with Clutch in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*. Vol. 57, N°4. pp 2081-2088. (in collaboration with L2EP in the frame of **MEGEVH-macro**)
- [RI-4] E. Vinot, J. Scordia, **R. Trigui**, B. Jeanneret, F. Badin (2008) Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius. *International Journal of Vehicle System Modelling and testing*. Vol 3, No 3, 2008. pp. 139-167.
- [RI-5] K. Chen, A. Bouscayrol, A. Berthon, P. Delarue, D. Hissel, **R. Trigui** (2009), Global modeling of different vehicles, using Energetic Macroscopic Representation to focus on system functions and system energy properties. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. vol. 4, no. 2, June 2009, pp. 80-89. (in collaboration with L2EP in the frame of **MEGEVH-macro**).
- [RI-6] J. Scordia, **R. Trigui**, M. Desbois-Renaudin, B. Jeanneret, F. Badin. (2009) Global Approach for Hybrid Vehicle Optimal Control. *Journal of Asian Electric Vehicles*. Vol 7, N° 1, pp. 1221-1230 June 2009.
- [RI-7] **R. Trigui**, B. Jeanneret, B. Malaquin, Plasse C. (2009) Performance Comparison of Three Storage Systems for Mild-HEVs using PHIL Simulation. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*. Vol 58 N° 8, October 2009. pp 3959-3969. (in collaboration with **Valeo**, Mildhybrid project)
- [RI-8] W. Lhomme, **R. Trigui**, A. Bouscayrol, P. Delarue, B. Jeanneret, F. Badin . Inversion-Based Control of a Vehicle with a Clutch using a Switched Causal Modelling. *International Journal of Systems Science*. (to be published in February 2011, vol. 42, no. 2). (in collaboration with L2EP in the frame of **MEGEVH-macro**).
- [RI-9] S. Kermani, **R. Trigui**, S. Delprat, B. Jeanneret, T. M. Guerra. PHIL Implementation of Energy Management Optimization for a Parallel HEV on a Predefined Route. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*. vol. 60, no. 3, March 2011, pp. 782-792. (En collaboration avec le LAMIH de Valenciennes dans le cadre de **MEGEVH-optim**)

- [RI- 10] Y. Cheng, **R. Trigui**, Ch. Espanet, A. Bouscayrol, S. Cui. Analysis of Technical Requirements from Toyota Prius II for Design of a PM-EVT. IEEE Transactions on vehicular technology, (accepté à paraître). (Collaboration in the frame of **MEGEVH-EVT**)

### Revue Nationale

- [RN-1] **R. Trigui**, F. Badin P. Maillard INRETS, A. Mailfert INPL (1996), Etude de l'usage réel d'un véhicule utilitaire électrique *Recherche Transports Sécurité* (50), 17-32.
- [RN-2] **R. Trigui**, B. Jeanneret, F. Badin (2004) Modélisation systémique de véhicules hybrides en vue de la prédiction de leurs performances énergétiques et dynamiques - Construction de la bibliothèque de modèles VEHLIB. *Recherche Transports Sécurité* vol. 21 n° 83, 129-150.
- [RN-3] F. Badin, Desbois Renaudin M., **R. Trigui**, B. Jeanneret, B. Malaquin, J. Scordia (2004) Véhicules hybrides, quels choix pour quels gains en émission de gaz à effet de serre. *Ingénieurs de l'Automobile* (769).
- [RN-4] F. Badin, **R. Trigui** (2006) Les motorisations hybrides thermique-électrique. *Revue de l'Electricité et l'Electronique*. N° 8 – septembre 2006. p 94-99.
- [RN-5] **R. Trigui** (2009) Les technologies hybrides et la réduction des émissions de CO2. *Revue Transport/Environnement/Circulation (TEC)*. N° 204 – Décembre 2009. p 26-31.

### Conférences invitées

**R. Trigui**, A. Bouscayrol. (2009). Modeling of hybrid electric vehicles for energy management. **Tutorial** in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Dearborn Mi (USA), September 2009. (in collaboration with L2EP in the framework of **MEGEVH**).

A. Bouscayrol, **R. Trigui**, C. MI (2009). Modelling methods for energy management of Hybrid Electric Vehicles. **Tutorial** in IEEE IECON09. Porto, Portugal, November 2009. (common tutorial of L2EP Lille, LTE-INRETS and University of Dearborn-Michigan within the framework of **MEGEVH** network).

### Congrès internationaux avec actes

- [CI-1] F. Badin, **R. Trigui**, A. Boubakri, INRETS - E. Combes, M. Delhom, Peugeot S.A (1996) Hybrid drive trains evaluation in actual use. *EVS 13 - 13th International Electric Vehicle Symposium*. Octobre 1996 Osaka Japon.
- [CI-2] **R. Trigui**, F. Badin, B. Jeanneret (1998) Les technologies hybrides thermique-électrique. Une solution pour la réduction des émissions de polluants. *Colloque sur les changements climatiques et pollution atmosphérique par le trafic routier*. Alger, 29-30 Juin 1998.
- [CI-3] **R. Trigui**, F. Badin, L. Azouzi INRETS - S. Derou, J. Beretta, Peugeot S.A (1998). Evaluation of EV drive trains. *Fisita World Automotive Congress*, Paris, Septembre 1998.
- [CI-4] F. Harel, **R. Trigui**, L. Azouzi , F. Badin , B. Jeanneret (1999) Two dimensional working optimisation of a wound rotor synchronous motor for EV drive train. *ELECTROMOTION symposium*, July 1999. Patras, Greece.

- [CI-5] F. Badin, B. Jeanneret, **R. Trigui**, F. Harel, JP Roumégoux, INRETS LTE, A Julien, R. Périot ALSTOM Transport, L. d'Ussel SAFT (1999) Evaluation of a true low floor 12m series hybrid bus. *EVS 16 - 16th International Electric Vehicle Symposium*. October 1999, Beijing China.
- [CI-6] B. Jeanneret, **R. Trigui**, F. Badin, F. Harel, (1999) New Hybrid concept simulation tool, evaluation on Toyota Prius car. *EVS 16 - 16th International Electric Vehicle Symposium*. October 1999, Beijing, China.
- [CI-7] F. Badin, B. Jeanneret, **R. Trigui**, F. Harel INRETS, A. Jullien ALSTOM Transport, M. Hannebique, M. Van Berten ANF Bombardier, R. Metkemeijer, D. Mayer Ecole des Mines de Paris, M. Smaha HAWKER-Oldham, L. Verdier LOHR Industrie, J. Beretta, M. Porcellato PSA Peugeot Citroën, M. Parmentier RATP, M. Durand, L. D'Ussel, M. Bariand SAFT, S. Biscaglia ADEME (2000) SIVTHEC, a research program to evaluate high power batteries ageing in actual use. *EVS 17 - 17th International Electric Vehicle Symposium*, October 2000, Montréal.
- [CI-8] F. Badin, B. Jeanneret, **R. Trigui**, F. Harel (2001) Hybrid vehicles, should we plug them to the grid or not ? **In** AVERE European Electric Road Vehicle Association: *EVS 18 - 18th International Electric Vehicle Symposium*, Berlin, Germany, October 20-24, 2001, p. 14.
- [CI-9] **R. Trigui**, F. Harel, J. Scordia, Bastiani P., Retif J.M., Lin-Shi X., Chabot F., Gimet E., Beretta J. (2001) Implementation and comparison of three approaches for energy optimized strategies of a synchronous machine and its inverter. **In** Technischen Universität Graz: *9th European Conference on Power Electronics and Applications*, Graz, Austria, August 27-29, 2001. VKM-THD Mitteilungen, p. 11.
- [CI-10] **R. Trigui**, F. Badin, B. Jeanneret, F. Harel, Coquery G., Lallemand R., Ousten J.P., Castagné M., Debest M., Gittard E., Vangraefshepe F., Morel V., Labbé J., Baghli L., Rezzoug A., Biscaglia S. (2002) Hybrid light duty vehicles evaluation program. **In** AVERE European Electric Road Vehicle Association: *EVS 19 - 19th International Electric Vehicle Symposium*, Busan, Korea, October, 2002.
- [CI-11] F. Badin, O. Briat, S. Olivier., B. Jeanneret, **R. Trigui**, B. Malaquin (2004) The use of batteries in hybrid vehicles. **In** IEEE: *IEEE VPP 2004 - International Symposium on Vehicular Power and Propulsion*, Paris, France, October 6-8, 2004.
- [CI-12] J. Scordia, M. Desbois Renaudin, **R. Trigui** (2004) Hybrid power train sizing and potential consumption gains. **In** IEEE: *IEEE VPP 2004 - International Symposium on Vehicular Power and Propulsion*, Paris, France, October 6-8, 2004.
- [CI-13] F. Badin, M. Desbois Renaudin, **R. Trigui**, B. Jeanneret, B. Malaquin, J. Scordia (2004) Véhicules hybrides, quels choix pour quels gains en émission de gaz à effet de serre. **In** CEREVERH Centre d'Etudes et de Recherches sur les Véhicules Electriques et Hybrides, SIA Société des Ingénieurs de l'Automobile: *2e Congrès Européen sur les Alternatives Energétiques dans l'Automobile*, Poitiers, France, 7-8 avril 2004.
- [CI-14] B. Jeanneret, **R. Trigui**, B. Malaquin, M. Desbois Renaudin , F. Badin, Plasse C., J. Scordia (2004) Mise en oeuvre d'une commande temps réel de transmission hybride sur banc d'essai moteur. **In** CEREVERH Centre d'Etudes et de Recherches sur les Véhicules Electriques et Hybrides, SIA Société des Ingénieurs de l'Automobile: *2e Congrès Européen sur les Alternatives Energétiques dans l'Automobile*, Poitiers, France, 7-8 avril 2004.
- [CI-15] **R. Trigui**, J. Scordia, M. Desbois Renaudin , B. Jeanneret, F. Badin (2004) Global forward backward approach for a systematic analysis and implementation of hybrid vehicle management laws - Application to a two clutches parallel hybrid power train. **In** 2004

*European ELE-Drive Transportation Conference & Exhibition*, Estoril, Portugal, March 17-19, 2004.

- [CI-16] J. Scordia, **R. Trigui**, B. Jeanneret, F. Badin, B. Malaquin (2005) Systematic elaboration of online energy management laws for hybrid vehicles. **In** AVERE European Electric Road Vehicle Association: *EVS 21 - 21th International Electric Vehicle Symposium*, Monaco, April 2-6, 2005.
- [CI-17] J. C Dabadie. P. Ménégazzi (IFP), **R. Trigui**, B. Jeanneret (INRETS) (2005). A new tool for advanced vehicle simulations. **In** *7th International Conference on Engines for automobile*. 16 and 17 september 2005, Capri, Napoli : Italie.
- [CI-18] J. Legranger, G. Friedrich, **R. Trigui**, F. Badin (2006). Integration of an Induction Machine Synthesis in a Multiphysic Simulation Tool for Automotive Applications. *XVII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Chania - Crete Island , Greece (Septembre 2006).
- [CI-19] S. Kermani, S. Delprat, **R. Trigui**, T. M. Guerra (2007). A comparison of two global optimization algorithms for hybrid vehicle energy management. *IFAC IEEE International conference on advances in vehicles and safety ACVS07*. Buenos Aires, Argentina. February 8-10 2007.
- [CI-20] A. Bouscayrol, Hissel D., S. Delprat, **R. Trigui** (2007) MEGEVH project: Graphical Modelling for Energy Management of Hybrid Electric Vehicles. *EET-2007 European Ele-Drive Conference, may 2007*. Brussels, Belgium.
- [CI-21] **R. Trigui**, B. Jeanneret, B. Malaquin, F. Badin, C. Plasse. (2007) Hardware In the Loop Simulation of a Diesel Parallel Mild-Hybrid Electric Vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 9-12 September 2007*. Arlington TEXAS.
- [CI-22] A. Bouscayrol, D. Hissel, **R. Trigui** (2008) Graphical description for inversion-based control of hybrid electric vehicles. *EET-2008 European Ele-Drive Conference*. Geneva, Switzerland, March 11 – 13, 2008
- [CI-23] M. Boujelben, **R. Trigui**, F. Badin, S. Ardizzone, D. Escudie. (2008). Modeling and Optimization of Plug-in Hybrid Urban Microbus. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 3-8 September 2008*. Harbin CHINA.
- [CI-24] S. Kermani, S. Delprat, T.M. Guerra, **R. Trigui**, (2008) Real time control of hybrid electric vehicle on a prescribed road. *Proceedings of the 17th World Congress. The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008
- [CI-25] S. Kermani, S. Delprat, **R. Trigui**, T.M. Guerra. (2008) Predictive energy management of hybrid vehicle. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 3-5, 2008, Harbin, China*
- [CI-26] S. Kermani, S. Delprat, **R. Trigui**, T.M. Guerra. (2009) Predictive control for HEV energy management: experimental results. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 7-11, 2009, Dearborn, Michigan*.
- [CI-27] **R. Trigui**, E. Vinot, M. Boujelben. (2009) Offline Optimization for Components Sizing and analysis of a Plug-in Hybrid Urban Microbus. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 7-11, 2009, Dearborn, Michigan*.
- [CI-28] A.L. Allegre, A. Bouscayrol, **R. Trigui**. (2009) Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 7-11, 2009, Dearborn, Michigan*.

- [CI-29] A.L. Allegre, **R. Trigui**, A. Bouscayrol, (2010) Different energy management strategies of Hybrid Energy Storage System (HESS) using batteries and supercapacitors for vehicular applications *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 1-3, 2010, Lille, France.*
- [CI-30] E. Vinot, **R. Trigui**, B. Jenneret, (2010) Optimal Management of Electric Vehicles with a Hybrid Storage System. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 1-3, 2010, Lille, France.*
- [CI-31] Y. Cheng, Ch. Espanet, **R. Trigui**, A. Bouscayrol, Sh. Cui, (2010) Design of a Permanent Magnet Electric Variable Transmission for HEV Applications *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 1-3, 2010, Lille, France.*
- [CI-32] K. Chen, **R. Trigui**, A. Bouscayrol, E. Vinot, W. Lhomme, A. Berthon (2010) A common model validation in the case of the Toyota Prius II. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 1-3, 2010, Lille, France.*
- [CI-33] J. K. Reed, J. McFarland, J. Tangudu, E. Vinot, **R. Trigui**, G. Venkataramanani, Sh. Gupta<sup>1</sup>, Th. Jahns<sup>1</sup> (2010) Modeling Power Semiconductor Losses in HEV Powertrains using Si and SiC Devices. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 1-3, 2010, Lille, France.*

## Congrès nationaux

- [CN-1] **R. Trigui**, F. Harel, B. Jeanneret, F. Badin INRETS, S. Dérou PSA (2000). Optimisation globale de la commande d'un moteur synchrone à rotor bobiné. Effets sur la consommation simulée de véhicules électriques et hybrides. *Colloque National GEVIQ'2000*. Marseille, Mars 2000.
- [CN-2] F. Badin, **R. Trigui**, A. Garcia, A. Vegas, G. Pede, J. Bourachot, E. Durelli, A. Engel, A. Jullien, P. Sanglan, INRETS, ENTA, ENEA, IRISBUS, ALSTOM Transport, Air Liquide (2000) Introduction de flottes de bus à piles à combustible dans trois villes de l'Europe du Sud. *Colloque Piles à combustible et Interface pour les transports*. 9-10 Novembre 2000. Belfort.
- [CN-3] B. Jeanneret, F. Harel, F. Badin, **R. Trigui**, F. Damemme, J. Lavy (2000) Evaluation des performances du véhicule hybride Toyota Prius. *Colloque C'VELEC00*, Grenoble 2000.
- [CN-4] F. Badin, B. Jeanneret, F. Harel, **R. Trigui**, INRETS (2000) Véhicules hybrides. *Prop-Elec 2000*, septembre 2000, La Rochelle.
- [CN-5] F. Badin, **R. Trigui**, B. Jeanneret, F. Harel, INRETS (2000) Stockages électrochimique de puissance adaptés aux transports en commun. *Colloque Gaston Planté*, 30 et 31 octobre 2000, CNAM Paris.
- [CN-6] B. Jeanneret, F. Harel, **R. Trigui**, F. Badin (2002) Evaluation du véhicule Nissan Tino Hybrid. **In** ENSIEG Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble: *5e Colloque C-VELEC '02 - Véhicules électriques et hybrides : Enjeux technologiques et perspectives*, Grenoble, France, 25-26 juin 2002. INRETS, p. 19-31.
- [CN-7] F. Badin, **R. Trigui**, B. Jeanneret, J. Scordia (2002) Les véhicules routiers à traction électrique ou hybride. **In** *Colloque Transport Terrestre Electrique*, Belfort, France, 25 avril 2002. INRETS.

[CN-8] E. Vinot, **R. Trigui**, B. Jeanneret. (2008) A complete set of tools for Hybrid Vehicle Design: from cybernetics model to Hardware in the loop Simulation. *Les Rencontres Scientifiques de l'IFP - Advances in Hybrid Powertrains*. 25-26 November 2008.

## Journées Scientifiques

**R. Trigui**. (2008) Hardware-in-the-loop simulation facility at INERTS and HEV applications. *International Workshop « Hardware In the Loop Simulation »*. 13-14 Novembre 2006. A l'université de Lille 1.

**R. Trigui** (2009) Gestion de l'énergie dans les véhicules hybrides. *Journée Electrotechnique 2009 du club EEA*. 11-12 mars 2009 à Polytech Lille.

**R. Trigui** D. Pilot, Ph. Dupuy (2010) Rappels introductifs sur les motorisations et carburants alternatifs. *Journée organisée par Rhône Alpes Energie, dans le cadre du projet européen CO2 NeutrAlp*. Villard de Lans. 15 Janvier 2010.

**R. Trigui**, Alain Bouscayrol (2010) Les véhicules électriques et hybrides - Topologies, modélisation et gestion de l'énergie. *Journée Electrotechnique 2010 du club EEA*. 17-18 mars 2010 à l'université de Franche Comté, Belfort.

## Rapports de recherche sur convention-contrat

F. Badin, **R. Trigui**, B. Jeanneret, L. Azouzi, F. Harel(1999) Projet VERT PSA-DRAI, Logiciel VERT, version 7.2, recueil des cas tests. *rapport LTE 9905*, Février 1999.

F. Badin, B. Jeanneret, **R. Trigui** (2001) Projets de plates-formes hybrides ECCE - Descriptif du logiciel de simulation de la transmission et gestion des groupes électrogènes. Alstom Power Conversion. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0110*, 56 p. ISRN INRETS/RR/01-522-FR.

B. Jeanneret, F. Harel, **R. Trigui**, F. Badin (2002) Rapport d'essai du véhicule NISSAN Tino Hybrid. ADEME. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0204*, 52 p. ISRN INRETS/RR/02-509-FR.

B. Jeanneret, **R. Trigui**, F. Badin (2002) Projet SIVTHEC : Description de la modélisation des véhicules. Ministère de la Recherche - Direction de la Technologie, Ministère de l'Équipement - Direction de la Recherche Recherche et des Affaires Scientifiques. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0225*.

F. Badin, B. Jeanneret, **R. Trigui** (2002) Projet Alstom - Bus à transmission innovante : Rapport final. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0237*, 48 p. ISRN INRETS/RR/02-548-FR.

Desbois Renaudin M., J. Scordia, B. Jeanneret, **R. Trigui**, F. Badin, Plasse C., Sarrau J.F. (2003) Etude paramétrique des véhicules hybrides thermique-electriques : PARAVH - Rapport Intermediaire N°2. ADEME, Valeo ES, Exide Ceac. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0326*, 89 p. ISRN INRETS/RR/03-547-FR.

**R. Trigui**, B. Jeanneret, F. Badin (2003) Projet SIVTHEC - Procédures d'essais de vieillissement des batteries et prise en compte dans le logiciel : Rapport final. Ministère de la Recherche - Direction de la Technologie, Ministère de l'Équipement - Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0321*, 84 p. ISRN INRETS/RR/03-538-FR.

Desbois Renaudin M., J. Scordia, B. Jeanneret, **R. Trigui**, F. Badin (2003) Etude paramétrique des véhicules hybrides thermique-électrique : PARAVH - rapport intermédiaire. ADEME. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0308*, 47 p. ISRN INRETS/RR/03-512-FR.

F. Badin, Vidon R., B. Jeanneret, **R. Trigui**, Tassel P., Perret P., B. Malaquin (2004) Mesure de la consommation d'énergie sur cycle du véhicule hybride Dassault-Heuliez VAL-VNX2 en mode électrique. Société des Véhicules Electriques. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0426*, 36 p. ISRN INRETS/RR/04-542-FR.

Desbois Renaudin M., J. Scordia, **R. Trigui**, F. Badin, B. Jeanneret, Plasse C., Sarrau J.F. (2004) Véhicules Hybrides Thermique Electrique - Etude paramétrique de l'architecture hybride parallèle : PARAVH - Rapport Final - Volume 3 : Données et Programmes. ADEME, Valeo ES, Exide CEAC. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0407*, 67 p.

Desbois Renaudin M., J. Scordia, **R. Trigui**, F. Badin, B. Jeanneret, Plasse C., Sarrau J.F. (2004) Véhicules Hybrides Thermique Electrique - Etude paramétrique de l'architecture hybride parallèle : PARAVH - Rapport Final - Volume 2 : Résultats. ADEME, Valeo ES, Exide CEAC. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0406*, 204 p.

Desbois Renaudin M., J. Scordia, **R. Trigui**, F. Badin, B. Jeanneret, Plasse C., Sarrau J.F. (2004) Véhicules Hybrides Thermique Electrique - Etude paramétrique de l'architecture hybride parallèle : PARAVH - Rapport Final - Volume 1 : Etude paramétrique de l'architecture hybride parallèle. ADEME, Valeo ES, Exide CEAC. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0405*, 168 p.

Ménégazzi P. (IFP), Aubret P. (Imagine), **R. Trigui** (INRETS) (2005). Rapport de fin de première étape du projet VECSim. Février 2005. *Rapport IFP n° 58558*.

**R. Trigui**, B. Jeanneret, B. Malaquin, Badin F (2007) Synthèse du Projet Mild-Hybrid : Simulation et implémentation sur banc moteur de trois configurations hybrides parallèles à 2 embrayages. *Rapport LTE0725*, 69 p.

**R. Trigui**, B. Jeanneret, B. Malaquin, E. Vinot (2008) Projet microbus microhybride - Simulation des architectures conventionnelles et start/stop sous VEHLIB. Rapport final. Rapport *LTE N°0829*

## Rapports de recherche hors convention-contrat

**R. Trigui**, B. Jeanneret, F. Badin. (1999) "Modélisation des véhicules à architectures complexes sous Simulink. Etude prospective pour une bibliothèque multi-niveaux". *Rapport INRETS-LTE N° 9926*. Septembre 1999.

**R. Trigui**, B. Jeanneret (2001) Modélisation de l'association convertisseur-machine pour la bibliothèque de simulation des véhicules VEHLIB. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0103*, 51 p. ISRN INRETS/RR/01-511-FR.

B. Jeanneret, **R. Trigui** (2001) Présentation de la bibliothèque de simulation de véhicules VEHLIB - Version 1.0. Bron, France: INRETS, *Rapport LTE0102*.

**R. Trigui**, F. Harel, J. Scordia, F. Badin (2002) Commande vectorielle optimisée en énergie d'un moteur synchrone à rotor bobiné - Théorie, méthodes et expérimentation. Bron, France: *INRETS, Rapport LTE0213*, 62 p. ISRN INRETS/RR/02-522-FR.

## Articles de vulgarisation

**R. Trigui** (2005). Les véhicules hybrides. Conférence au Lycée Maryse Bastié à Décines dans le cadre de la manifestation BDécines. Mai 2005.

S. Pelissier **R. Trigui** Paroles de chercheurs : Feu vert pour les voitures propres (2009). Edition INRETS

**R. Trigui**, B. Vulturescu (2009). Des moteurs hybrides plus intelligents. Axes, le magazine recherche et transport de l'INRETS. N° 51. Décembre 2009.