



Université de Lille – Sciences et Technologies  
Ecole Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'université de Lille 1

Spécialité : Génie Electrique

Présentée et soutenue publiquement par

**Ali CASTAINGS**

le 31 mai 2016

---

GESTION D'ENERGIE DE VEHICULES MULTI-SOURCES ELECTRIQUES ET  
HYBRIDES AU TRAVERS DE LA REPRESENTATION ENERGETIQUE  
MACROSCOPIQUE

---

**Membres du jury :**

<b>M. Davide AGUGLIA</b>	CERN Genève	Examineur
<b>M. Alain BOUSCAYROL</b>	Université Lille 1	Directeur de thèse
<b>M. Walter LHOMME</b>	Université Lille 1	Co-encadrant
<b>M. Serge PIERFEREDICI</b>	Université de Lorraine	Président
<b>M. Xavier ROBOAM</b>	Université de Toulouse	Rapporteur
<b>M. Rochdi TRIGUI</b>	IFSTTAR-LTE	Co-directeur
<b>M. João TROVAO</b>	Université de Sherbrooke	Examineur
<b>M. Pascal VENET</b>	Université Lyon 1	Rapporteur



« *Apatoudi menné koulèv lékol, sé fè-y sizé i tout* » (proverbe créole)

« Ce n'est pas tout d'emmener une couleuvre à l'école, encore faut-il la faire s'asseoir »

Ou encore

« Ce n'est pas tout d'entreprendre, le plus difficile est de mener le projet à son terme »



# Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier Messieurs Alain BOUSCAYROL, Rochdi TRIGUI et Walter LHOMME, respectivement Professeur à l'Université Lille 1, Directeur de Recherche à l'IFSTTAR-LTE et Maître de Conférences à l'Université Lille 1. Les nombreux échanges que nous avons eus ont permis d'apporter énormément à cette thèse de doctorat, que ce soit sur le plan qualitatif ou quantitatif. Je les remercie pour tout cela.

J'aimerais remercier Monsieur Serge PIERFEREDICI, Professeur à l'Université de Lorraine, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury et d'être examinateur de cette thèse de doctorat.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à Monsieur Xavier ROBOAM, Directeur de Recherche CNRS à l'Université de Toulouse, mais également à Monsieur Pascal VENET, Professeur à l'Université Lyon 1, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon mémoire de thèse de doctorat. Leurs remarques ont permis d'enrichir le travail effectué.

Je suis très reconnaissant envers Messieurs Davide AGUGLIA et João TROVAO, respectivement Chercheur au CERN de Genève et Professeur à l'Université de Sherbrooke, d'avoir accepté d'être examinateurs de cette thèse. Les différents échanges que nous avons eus ont été particulièrement intéressants.

Mes remerciements vont également aux membres du bâtiment P2 que je côtoie ou que j'ai côtoyé. Chercheurs et non chercheurs, membres du L2EP et non-membres. Je ne citerai volontairement aucuns prénoms par peur d'en oublier. En tous cas j'ai apprécié l'ambiance qui y règne. Je remercie également les membres de l'IFSTTAR-LTE de Bron pour leur accueil. Notamment Eduardo pour le temps qu'il m'a consacré pour les essais sur les batteries. Je n'y suis pas allé souvent, mais j'ai sincèrement apprécié les rencontres que j'ai faites.

Je finirai par remercier ma compagne pour soutien infailible et ma famille de Guadeloupe qui a été présente malgré la distance.



# Résumé

Les véhicules routiers sont à une étape majeure de leur histoire. Face aux enjeux actuels d'ordre économiques et environnementaux, le véhicule routier du futur se doit d'être le moins énergivore et avoir une empreinte environnementale la plus réduite possible. Les véhicules multi sources représentent des solutions intéressantes afin de répondre à ces préoccupations. Cependant, ces véhicules utilisent des systèmes de propulsion particulièrement complexes tant au niveau de leur architecture que de leur commande. En particulier, la gestion des différentes sources d'énergie représente un point clé pour l'efficacité énergétique et environnementale des véhicules à concevoir. Elle devient un réel challenge dès que l'on dépasse le nombre usuel de deux sources comme dans le cas des véhicules hybrides actuels et des véhicules électriques mixtes (batterie et supercondensateurs).

L'objectif des travaux relatifs à cette thèse est de proposer une méthodologie structurée pour la synthèse de la gestion d'énergie en temps réel, de véhicules multi-sources électriques ou hybrides. Cette démarche s'appuie sur une approche systémique utilisant la modélisation et la Représentation Energétique Macroscopique (REM) en tant qu'outil d'aide à la synthèse des modèles et de la commande associée. Une démarche systématique pour la synthèse des stratégies basées sur la commande optimale a été ensuite associée à cet ensemble profitant de la REM comme outil structurant.

En effet, la REM respectant la causalité « physique » (causalité intégrale) d'une part, et permettant d'effectuer une distinction claire entre la commande dite « locale » et le niveau « stratégie » d'autre part, la formulation du problème de commande optimale est réalisée de manière efficace et structurée. Ainsi, en partant du cas du véhicule électrique avec un système multi-source batterie/supercondensateurs déjà étudiée dans la littérature, la méthode a été appliquée pour la synthèse d'une loi de gestion d'énergie basée sur la commande optimale. Ensuite, des sources ont été rajoutées pour passer au cas de trois sources en incluant une Pile à combustible puis quatre sources en rajoutant un groupe électrogène.

Les principes développés sont validés par simulation et par l'intermédiaire de tests expérimentaux, afin de s'assurer entre autres, de la faisabilité en temps réel des stratégies développées

**Mots clés** : gestion d'énergie, multi-source, véhicules électriques et hybrides, batterie, supercondensateurs, pile à combustible, Représentation Energétique Macroscopique (REM), optimisation, simulation « Hardware-In-the-Loop (HIL) », validation expérimentale

# Abstract

Road vehicles are at a turning point of their history. In order to face economic and environmental challenges, road vehicle of the future must be less energy-consuming and less polluting. Multi sources vehicles represent interesting solutions in order to comply with these challenges. However, these vehicles use particularly complex propulsion systems, both on the architecture level and the control level. The management of the different energy sources represents a key issue for the energy efficiency of the vehicles to be designed. It becomes a real challenge as soon as one exceeds the usual number of two sources, as in current hybrid vehicles and mixed electric vehicles (battery and supercapacitors).

The objective of the works relative to this thesis is to propose a structured method for the synthesis the energy management in real time, of electric or hybrid multi-sources vehicles. This approach is based on a systemic approach using the modeling and Energetic Macroscopic Representation (EMR) as a tool of assistance to the synthesis of the models and the related control. A systematic way for the synthesis of the strategies based on optimal control, has been associated benefitting from EMR tool.

Indeed, EMR respecting “physical” causality (integral causality) on the one hand, and giving a clear distinction between the control level known as “local” and the “strategy” level on the other hand, the formulation of the optimal control problem is carried out and efficiently structured. Thus, on the basis of the electric vehicle case with a multi-source system battery/supercapacitors already studied in the literature, the method was applied for the synthesis of an energy management law based on the optimal control. Then, sources were added to pass to the case of three sources by including a Fuel cell, then four sources by adding a generator set.

The developed principles are validated by simulation and experimental tests, in order to assess the feasibility in real time of the developed strategies

**Key words:** energy management multi-source, electric and hybrid vehicles, battery, supercapacitors, fuel-cell, Energetic Macroscopic Representation (EMR) optimisation, « Hardware-In-the-Loop (HIL) » simulation, experimental validation

## Table des matières

Introduction générale .....	- 1 -
Chapitre I: Gestion d'énergie de véhicules multi-sources, contexte et problématiques.....	- 5 -
I.1 Environnement et véhicules .....	- 6 -
I.1.1 Enjeux des véhicules routiers « du futur » .....	- 6 -
I.1.2 Solutions envisagées .....	- 9 -
I.2 Véhicules multi-sources électriques et hybrides.....	- 10 -
I.2.1 Définitions .....	- 10 -
I.2.2 Sources d'énergie et limitations .....	- 13 -
I.2.3 Systèmes multi-sources .....	- 16 -
I.3 Gestion d'énergie de systèmes multi-sources .....	- 17 -
I.3.1 Organisation de la commande .....	- 18 -
I.3.2 Stratégies de gestion d'énergie à base de règles expertes.....	- 21 -
I.3.3 Stratégies de gestion d'énergie à base d'optimisation .....	- 22 -
I.3.4 Limitations des approches utilisées .....	- 25 -
I.4 Méthode générique de gestion d'énergie .....	- 29 -
I.4.1 Cadre des travaux.....	- 29 -
I.4.1 Objectif et positionnement.....	- 29 -
I.5 Conclusion du chapitre.....	- 32 -
Chapitre II : Structuration de la gestion d'énergie pour véhicule à 2 sources .....	- 33 -
II.1 Cas du VE batterie/SCs avec un convertisseur.....	- 34 -
II.1.1 Architecture du système.....	- 34 -
II.1.2 Dimensionnement des éléments .....	- 36 -
II.2 Organisation de la commande du véhicule étudié .....	- 37 -
II.2.1 Modélisation et Représentation Energétique Macroscopique .....	- 37 -
II.2.2 Structure de commande par inversion .....	- 39 -
II.3 Stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation .....	- 41 -
II.3.1 Principe de la commande optimale.....	- 41 -
II.3.2 Formulation du problème d'optimisation à partir de la REM .....	- 43 -
II.3.3 Résolution du problème d'optimisation .....	- 48 -
II.3.4 Résultats de simulations .....	- 52 -
II.4 Extension à d'autres véhicules à 2 sources.....	- 55 -
II.4.1 Véhicule électrique batterie-SCs avec 2 convertisseurs.....	- 56 -
II.4.2 Véhicule à Pile à Combustible.....	- 62 -
II.5 Conclusion du chapitre.....	- 67 -
Chapitre III : Structuration de la gestion d'énergie pour un véhicule à 3 sources .....	- 69 -
III.1 Cas du véhicule PaC-batterie-SCs .....	- 70 -
III.1.1 Architecture du système.....	- 70 -

III.1.2 Dimensionnement des éléments .....	- 71 -
III.1.3 Organisation de la commande du véhicule étudié.....	- 71 -
III.2 Stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation .....	- 75 -
III.2.1 Formulation du problème d'optimisation à partir de la REM.....	- 75 -
III.2.2 Résolution du problème d'optimisation .....	- 79 -
III.2.3 Résultats de simulations .....	- 81 -
III.3 Gestion d'énergie par décomposition .....	- 84 -
III.3.1 Principe général .....	- 84 -
III.3.2 Organisation de la commande du système .....	- 85 -
III.3.3 Stratégie de gestion d'énergie .....	- 87 -
III.3.4 Comparaison avec l'approche globale.....	- 89 -
III.4 Application à des véhicules de plus de 3 sources .....	- 91 -
III.4.1 Véhicule hybride série à quatre sources.....	- 92 -
III.4.2 Vers les véhicules à N sources .....	- 100 -
III.5 Conclusion du chapitre.....	- 107 -
Chapitre IV : Validation expérimentale des stratégies.....	- 109 -
IV.1 Emulation du véhicule électrique Tazzari Zéro.....	- 110 -
IV.1.1 Principe de l'émulation temps réel.....	- 110 -
IV.1.2 Le véhicule Tazzari Zéro .....	- 111 -
IV.2 Cas du véhicule électrique batterie-SCs.....	- 113 -
IV.2.1 Emulation du véhicule .....	- 113 -
IV.2.2 Comparaison avec une stratégie à base de règles .....	- 115 -
IV.3 Cas du véhicule PàC-batterie-SCs .....	- 121 -
IV.3.1 Emulation du véhicule .....	- 121 -
IV.3.2 Comparaison des stratégies de commande.....	- 124 -
IV.4 Conclusion du chapitre.....	- 134 -
Conclusion générale .....	- 135 -
Nomenclature.....	- 139 -
Acronymes .....	- 141 -
Annexe A : éléments constitutifs de la REM .....	- 143 -
Annexe B : modélisation, REM et commande du sous-système de propulsion .....	- 144 -
Annexe C : dimensionnement pour le véhicule batterie-SCs .....	- 149 -
Annexe D : caractérisation de la batterie de la Tazzari Zero .....	- 155 -
Annexe E : méthode pour la réduction de modèles .....	- 163 -
Annexe F : détails des calculs pour l'optimisation.....	- 167 -
Annexe G : dimensionnement du système PàC.....	- 176 -
Annexe H : dimensionnement pour le véhicule PàC-batterie-SCs.....	- 179 -
Annexe I : éléments de gestion d'énergie d'un véhicule MCI-batterie-SCs.....	- 183 -
Références bibliographiques .....	- 186 -

# Introduction générale

Face aux enjeux actuels d'ordre énergétique et environnemental, un nouveau cahier des charges doit être établi pour les véhicules du futur. Ceux-ci doivent être les moins énergivores et polluants possible.

Les véhicules électriques (VEs) représentent une solution intéressante afin de répondre à ces différents enjeux. Leur viabilité par rapport aux véhicules routiers conventionnels (thermiques) n'est néanmoins pas assurée. Cela est dû aux limitations des éléments de stockage d'énergie, les batteries. Les principales limitations des batteries sont l'énergie massique (autonomie du véhicule), le temps de recharge et la durée de vie. Une des solutions envisagées afin de pallier les limitations des VEs serait d'associer des sources d'énergie aux caractéristiques complémentaires, afin de se prévaloir des avantages de chacune d'elles. Cela correspond aux véhicules multi-sources.

Des VEs utilisant plusieurs sources d'énergie ont déjà été étudiés. Il existe notamment l'association de batteries et de bancs de supercondensateurs, qui permet de diminuer les sollicitations des batteries et par conséquent, d'augmenter leur durée de vie. Parmi les véhicules utilisant plusieurs sources d'énergie, les Véhicules Hybrides (VHs) conventionnels combinent deux sources d'énergies (moteur à combustion interne et réservoir de carburant avec une batterie). Ces types de véhicules sont des systèmes particulièrement complexes à gérer. Il faut trouver la manière la plus appropriée d'utiliser le degré de liberté induit par l'association des sources. C'est la gestion d'énergie du véhicule. Par ailleurs, des véhicules à plus de deux sources peuvent être envisagés, afin de bénéficier de caractéristiques supplémentaires. La complexité de la gestion d'énergie est par conséquent accrue dans ce cas. Il est nécessaire de déterminer des méthodes permettant d'assurer la gestion d'énergie de systèmes aussi complexes et ce, de manière efficace.

Différents travaux ont été réalisés sur les véhicules multi-sources. Outre le dimensionnement des éléments, l'une des problématiques majeures est la stratégie de gestion d'énergie. Deux approches sont communément utilisées dans ce domaine : les stratégies à base de règles expertes et les stratégies à base d'optimisation (basées sur le principe de la commande optimale) [Salmasi 2007], [Guzzella 2013a]. Les stratégies à base de règles ont été les premières à être développées pour leur simplicité de mise en œuvre. Ces stratégies ont l'avantage d'être pleinement applicables en temps réel, mais ne garantissent pas le comportement optimal du système multi-source. Les stratégies à base d'optimisation ont tout d'abord été utilisées hors ligne [Delprat 2004], afin de définir le comportement optimal théorique du système, pour des conditions de conduite données (cycle connu *a priori*) et des contraintes prédéfinies. Elles sont toujours utilisées pour évaluer les performances de stratégies temps réel ou pour dimensionner le système étudié. Le temps de calcul prohibitif et la nécessité de la connaissance du cycle de conduite *a priori* ne permettent pas de les

utiliser en temps réel. Des stratégies temps réel à base d'optimisation sont alors apparues [Kessels 2008]. Ces stratégies permettent d'assurer un comportement plus ou moins proche de l'optimum. Certains développements ont été proposés pour prendre en compte la variabilité des cycles de conduite [Kermani 2009]. Par ailleurs, la problématique majeure liée aux deux approches (règles et optimisation) est la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie, qui est loin d'être systématique, même dans le cas des véhicules à 2 sources.

Des applications des stratégies à base de règles ont été effectuées dans le cas de véhicules à deux sources [Li 2012], [Florescu 2015] et plus [Gao 2008], [Azib 2014]. La gestion d'énergie à base d'optimisation, quant à elle, est relativement complexe pour des applications à deux sources. Cette complexité s'accroît avec l'augmentation du nombre de sources. Des premières applications de stratégies à base d'optimisation ont été effectuées pour des véhicules à trois sources [Yu 2011], [Santucci 2014]. Les travaux concernant les stratégies à base d'optimisations appliquées à ce type de systèmes, sont principalement axés sur des stratégies hors ligne. De plus, les différents développements sont basés sur des cas précis. Le développement d'une méthodologie structurée dédiée à la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie, valable pour plusieurs configurations de véhicules multi-sources, pourrait être un moyen efficace de faciliter la conception de la stratégie de gestion d'énergie de tels systèmes.

La gestion d'énergie de véhicules multi-sources est l'une des thématiques du réseau scientifique national MEGEVH<sup>1</sup> (Modélisation Energétique et Gestion d'Énergie des Véhicules Hybrides). Les travaux réalisés au sein du réseau ont été essentiellement axés jusque-là autour des véhicules à deux sources d'énergie [Kermani 2009], [Allègre 2010b]. Des travaux récents ont été réalisés sur le développement d'une méthode afin d'aider à la conception de la stratégie, avec une application sur une stratégie hors ligne à base d'optimisation [Horrein 2015b]. La présente thèse se déroule dans le cadre du réseau MEGEVH, entre le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP) et le LTE-IFSTTAR à Bron. Elle s'inscrit dans le projet MEGEVH multi-source qui consiste à réaliser l'étude de véhicules à propulsion électrique, alimentés par plusieurs sources d'énergie, avec la prise en compte de la durée de vie des sources.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode structurée pour la synthèse de la gestion temps réel de l'énergie, de véhicules multi-sources électriques ou hybrides. Même si la démarche de décomposition des niveaux de commande et des choix des variables de commande reste à un niveau générique, la thèse fait un focus particulier sur les stratégies temps réel à base d'optimisation.

Les travaux ont requis l'utilisation d'outils multi-domaines d'une part, et structurants d'autre part. La Représentation Energétique Macroscopique (REM) a été utilisée tout au long de l'étude en tant que formalisme de représentation et de commande multi-domaines. La méthodologie mise en place utilise la REM comme une aide à la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie, notamment dans le choix des variables à prendre en compte, mais aussi dans la décomposition du système multi-source afin de faciliter la synthèse de la stratégie.

---

<sup>1</sup> <http://www.megevh.org/>

Les principes sont d'abord développés pour des véhicules à deux sources en partant des travaux existant au sein du réseau MEGEVH, notamment pour les associations batterie/supercondensateurs. Ensuite l'introduction d'une pile à combustible comme source supplémentaire a permis d'étudier le cas de véhicule à trois sources et enfin à quatre sources en ajoutant un groupe électrogène.

Le **premier chapitre** du mémoire de thèse expose les différents enjeux et leviers relatifs au véhicule terrestre du futur. Les véhicules multi-sources sont présentés comme faisant partie des solutions permettant de faire face à ces différents enjeux. Une étude bibliographique sur la gestion d'énergie des véhicules multi-sources est réalisée afin d'introduire l'objectif de la thèse. Des définitions relatives aux véhicules multi-sources sont établies afin de mener à bien les travaux.

Le **second chapitre** propose une méthode de gestion d'énergie de manière structurée de véhicules à deux sources. Dans la méthode développée, la REM est utilisée pour réaliser des stratégies de gestion d'énergie temps réel à base d'optimisation (méthode du  $\lambda$ -control) pour trois types de véhicules à deux sources. Une validation par simulation des différentes stratégies est proposée.

Le **troisième chapitre** est consacré à la gestion d'énergie en temps réel de véhicules à plus de deux sources d'énergie. Les principes développés dans le second chapitre sont étendus. Dans un second temps, la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie d'un véhicule à trois sources est réalisée en décomposant le système en sources équivalentes. La méthode de décomposition est également appliquée à un véhicule à quatre sources d'énergie. Une validation par simulation des différentes stratégies est effectuée.

Pour conclure, le **quatrième chapitre** traite de la validation expérimentale de trois des stratégies présentés dans le mémoire. Cela est réalisé notamment pour valider la faisabilité des stratégies en temps réel. Les tests expérimentaux utilisent l'émulation à échelle réduite du système de propulsion d'un véhicule électrique associé à des sources réelles.



# Chapitre I : Gestion d'énergie de véhicules multi-sources, contexte et problématiques

## Résumé du chapitre

L'objectif du chapitre est de mettre en évidence l'intérêt des développements de la thèse, au travers des travaux récents sur la gestion d'énergie de véhicules multi-sources. Ce chapitre permet également de présenter la démarche utilisée lors de la réalisation des travaux. Cette démarche consiste à réaliser la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie du véhicule de manière structurée, par l'intermédiaire du formalisme graphique Représentation Energétique Macroscopique (REM).

La première partie traite de la problématique des véhicules routiers « du futur ». La seconde partie vise à présenter le concept de véhicules multi-sources. La troisième partie présente les différentes méthodes de gestion d'énergie utilisées dans les véhicules multi-sources. La dernière partie est dédiée à la présentation du cahier des charges de la thèse.

## Plan du chapitre

I.1	Environnement et véhicules .....	- 6 -
I.1.1	Enjeux des véhicules routiers « du futur » .....	- 6 -
I.1.2	Solutions envisagées .....	- 9 -
I.2	Véhicules multi-sources électriques et hybrides.....	- 10 -
I.2.1	Définitions .....	- 10 -
I.2.2	Sources d'énergie et limitations .....	- 13 -
I.2.3	Systèmes multi-sources .....	- 16 -
I.3	Gestion d'énergie de systèmes multi-sources .....	- 17 -
I.3.1	Organisation de la commande .....	- 18 -
I.3.2	Stratégies de gestion d'énergie à base de règles expertes .....	- 21 -
I.3.3	Stratégies de gestion d'énergie à base d'optimisation .....	- 22 -
I.3.4	Limitations des approches utilisées .....	- 25 -
I.4	Méthode générique de gestion d'énergie .....	- 29 -
I.4.1	Cadre des travaux.....	- 29 -
I.4.1	Objectif et positionnement.....	- 29 -
I.5	Conclusion du chapitre.....	- 32 -

## I.1 Environnement et véhicules

### I.1.1 Enjeux des véhicules routiers « du futur »

Tout d'abord, les travaux qui ont été réalisés dans le cadre de cette thèse sont relatifs aux véhicules routiers. Trois enjeux majeurs concernant les véhicules routiers « du futur » peuvent être énoncés : écologie, économie, nuisances.

Afin de présenter ces différents enjeux des véhicules<sup>1</sup> routiers « du futur », il est nécessaire de donner quelques chiffres clés. Tout d'abord, selon un rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie datant de 2013, les transports (toutes catégories confondues) comptaient pour la moitié de la consommation mondiale de carburant fossile en 2012 [IEA 2013], soit presque 20 % de la consommation énergétique globale. Environ 40 % de cette énergie était utilisée pour les transports urbains uniquement. Cette consommation pourrait doubler d'ici 2050. Par ailleurs, cette tendance se confirme en France comme le montre un rapport publié par le Commissariat Général au Développement Durable en 2015 [CGDD 2015a]. L'évolution de la consommation d'énergie finale<sup>2</sup> par secteur en France, de 1970 à 2013, est représentée Figure I-1. Les transports représentaient 32 % de la consommation d'énergie finale en 2013 soit environ un tiers de la consommation totale. Les transports représentent donc une part significative de la consommation d'énergie dans le pays.

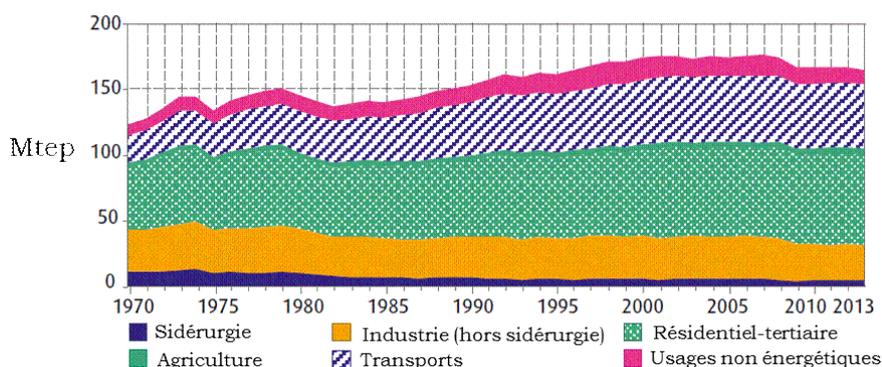


Figure I-1 : consommation d'énergie finale par secteur en France [CGDD 2015a]

Cette consommation d'énergie impacte l'environnement. Les transports sont responsables de 30 % des émissions de gaz à effet de serre en France [CGDD 2015b]. Tout cela impacte de manière plus ou moins importante les différents écosystèmes de la planète. Signe que la situation devient critique, les instances dirigeantes mondiales se mobilisent pour faire face à ce problème. La France a accueilli par exemple, la 21<sup>e</sup> Conférence des parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP21/CMP11), à la fin de l'année 2015. L'objectif était de signer un nouvel accord international sur le climat, pour maintenir le réchauffement climatique en-dessous de 2°C à

<sup>1</sup> Mot désignant tout moyen de transport, <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/> (dernière consultation en mars 2016)

<sup>2</sup> Énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (essence à la pompe, électricité au foyer,...), <http://www.insee.fr/fr/methodes/> (dernière consultation en mars 2016)

horizon 2100. La lutte contre le changement climatique est devenue une priorité gouvernementale à l'échelle de la France et plus globalement de l'Union Européenne. Le Conseil de l'Union européenne a par exemple, fixé un objectif de réduction de 27 % des émissions de dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>), des véhicules neufs vendus à partir de 2020 par rapport à ceux vendus en 2015. En France, depuis 1990, la responsabilité des différents types de véhicules dans les émissions de CO<sub>2</sub> n'a pas beaucoup évolué. Avec 94,6 % à eux seuls, les transports routiers représentaient la part prépondérante dans les émissions de CO<sub>2</sub> du pays en 2013 [CGDD 2015b] (Figure I-2). L'Union européenne a mis également en place des mesures concernant les émissions polluantes des véhicules routiers thermiques. Les normes Euro 5 et Euro 6, imposent des limites d'émissions polluantes pour les véhicules particuliers et utilitaires légers neufs. La norme Euro 5 est entrée en vigueur en septembre 2009 alors que la norme Euro 6 a pris effet le 1<sup>er</sup> septembre 2015. La norme Euro 6 impose entre autres, une réduction de plus de 50 % des émissions d'oxydes d'azote des véhicules de type Diesel par rapport à la norme Euro 5 (Tableau I-1).

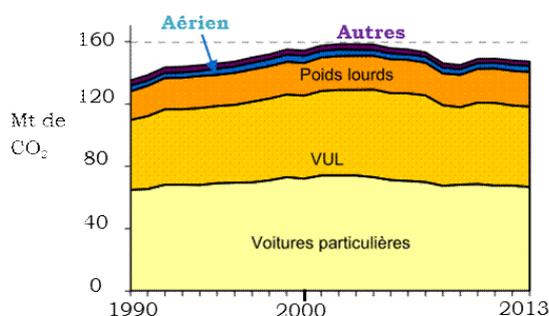


Figure I-2 : évolution des émissions de CO<sub>2</sub> par type d'émetteur dans les transports<sup>1</sup> [CGDD 2015b]

Les enjeux d'ordre écologique ont été abordés précédemment. Cependant, il est également nécessaire de prendre en compte les enjeux d'ordre économique. Tout d'abord, les différentes mesures gouvernementales énoncées précédemment imposent aux constructeurs automobiles d'avoir un positionnement fort sur le marché des véhicules à « faible » émissions. Ceux-ci risquent de ne pas pouvoir être compétitifs dans les années à venir, s'ils ne s'engagent pas dans cette voie. Les constructeurs automobiles doivent également trouver des solutions, pour réduire la consommation de carburant fossile des véhicules proposés. Dans une étude de l'institut de sondage TNS Sofres sur les critères d'achat d'un véhicule neuf, datant de mai 2014, 66 % des personnes interrogées ont indiqué qu'elles considéraient la consommation de carburant du véhicule comme un critère majeur<sup>2</sup> d'achat.

Il y a un dernier enjeu lié aux véhicules routiers du futur. Celui-ci concerne la réduction des nuisances. Par exemple, le bruit relatif à une rue à fort trafic, serait à la limite de seuil de risque recommandé par l'Organisation Mondiale de la Santé. Le seuil de risque est de 85 dB, alors que le niveau de bruit généré par une rue à fort trafic est de 80 dB<sup>3</sup> Par

<sup>1</sup> VUL correspond aux Véhicules Utilitaires Légers

<sup>2</sup> <http://www.tns-sofres.com/> (dernière consultation février 2016)

<sup>3</sup> <http://www.ecoresponsabilite.ademe.fr/> (dernière consultation février 2016)

ailleurs, les rejets d'émissions polluantes font évidemment partie des nuisances associées aux véhicules thermiques conventionnels.

Tableau I-1 : normes Euro 5 et Euro 6<sup>1</sup>.

<b>Norme</b>	<b>Moteur Diesel</b>	<b>Moteur essence</b>
Euro 5 (Septembre 2009)	Monoxyde de carbone : 500 mg/km	Monoxyde de carbone : 1000 mg/km
	Particules : 5 mg/km	Particules <sup>2</sup> : 5 mg/km
	Oxydes d'azote (NOx) : 180 mg/km	Hydrocarbures totaux : 100 mg/km
	Hydrocarbures et NOx : 230 mg/km	Oxydes d'azote (NOx) : 60 mg/km
		Hydrocarbures non méthaniques : 68 mg/km
Euro 6 (Septembre 2015)	Monoxyde de carbone : idem à Euro 5	
	Particules : Idem à Euro 5	
	Oxydes d'azote (NOx) : 80 mg/km	
	Hydrocarbures et NOx : 170 mg/km	
		Idem à Euro 5

Les différents enjeux des véhicules « du futur » ainsi que les leviers de réduction associés sont présentés Figure I-3. Les véhicules du futur devront avoir des consommations de carburant ainsi que des émissions (gaz à effet de serre et polluants) les plus faibles possibles. De plus, afin de limiter les nuisances occasionnées, ils devront diminuer leurs émissions sonores. Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que chaque enjeu fait intervenir plusieurs leviers de réductions. Par conséquent, le véhicule routier du futur correspond à un problème *systemique*. En effet, il ne faut pas regarder chaque enjeu et levier de manière indépendante, mais le tout dans sa globalité. Les différents enjeux font intervenir des leviers de réduction communs. Ils sont en interaction. Les différents enjeux et leviers énoncés peuvent être mis en évidence en prenant l'exemple de véhicules actuels. Les véhicules électriques permettent de ne pas consommer de carburant fossile, n'occasionnent pas d'émissions de gaz à effet de serre et de polluants, et génèrent un bruit particulièrement limité (à relativiser par rapport au cycle de vie du véhicule). Les véhicules hybrides (moteur thermique-batterie) permettent de réduire la consommation de carburant fossile et les émissions de gaz à effet de serre et de polluants, par l'intermédiaire de l'utilisation d'une batterie (avec une ou plusieurs machines électriques). Ce type de véhicule permet également de générer un bruit particulièrement faible en mode tout électrique.

<sup>1</sup> <http://eur-lex.europa.eu/> (extrait du journal officiel de l'Union européenne, dernière consultation en mars 2016)

<sup>2</sup> Uniquement véhicules à injection directe fonctionnant en mélange pauvre

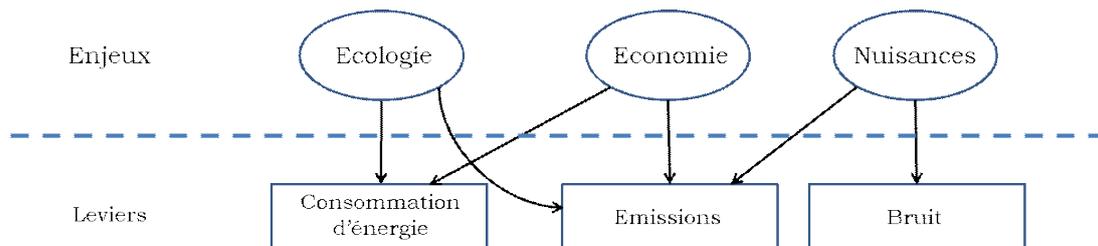


Figure I-3 : différents enjeux des véhicules du futur et leviers de réduction associés

### I.1.2 Solutions envisagées

Les véhicules électriques représentent une solution importante pour réduire l'impact des transports en termes de consommation énergétique et d'émissions polluantes [Chan 2009]. La part du nombre d'immatriculations total de véhicule routiers par motorisation en France, de 2004 à 2014 est représentée (Figure I-4). Les véhicules électriques ne représentaient que 0,6 % du nombre total de véhicule en 2014. Cela reste très faible par rapport aux autres types de véhicules, notamment les véhicules thermiques (essence et Diesel) qui représentaient 99 % du nombre total de véhicules en 2014 sur le territoire français. Le développement des véhicules électriques doit faire face, entre autres, aux inconvénients liés aux batteries. Ces aspects seront développés par la suite (§ I.2.2).

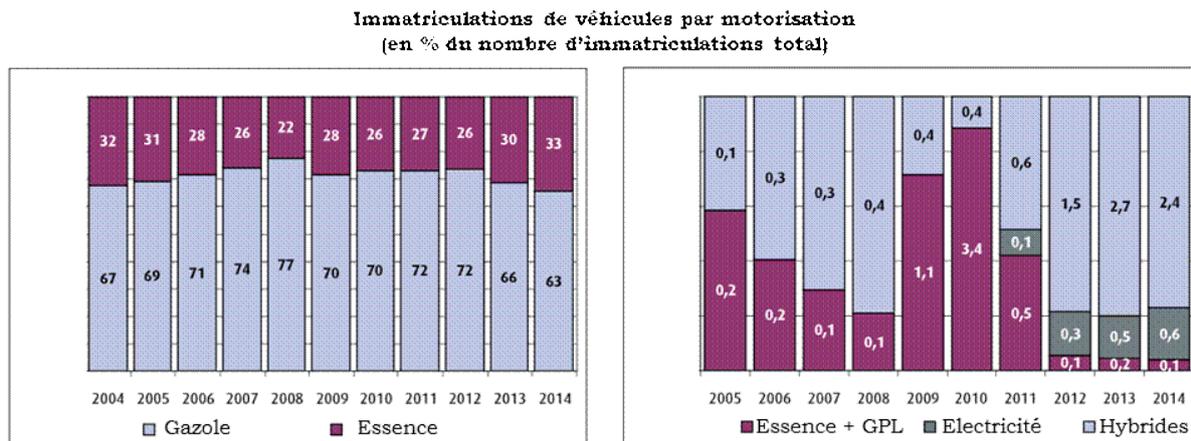


Figure I-4 : immatriculations d'automobiles en France de 2004 à 2014 par motorisation [CGDD 2015c]

Les systèmes multi-sources représentent une solution mise en place afin de faire face à ces différentes limitations. Le type de véhicules multi-sources le plus répandue, est le véhicule hybride avec un moteur à combustion interne (+ carburant fossile) et une batterie (+ machine électrique). Par ailleurs, dans le sens strict du terme, un véhicule thermique est également un véhicule multi-source. En effet, une batterie (associée à l'alternateur) est utilisée pour démarrer le moteur à combustion interne. Cependant, la machine électrique (alternateur) n'est pas utilisée pour la mobilité du véhicule. Un ensemble de véhicules électriques et hybrides présents sur le marché français est présenté Figure I-5. Les véhicules électriques avec prolongateur d'autonomie, correspondent à des véhicules électriques auxquels un moteur thermique a été incorporé, afin d'augmenter l'autonomie du véhicule. Le panel de véhicules présenté n'est pas exhaustif. En effet, les véhicules hybrides « classiques », sans possibilité de recharge de la batterie hors fonctionnement du véhicule,

ne sont pas présentés. Le point intéressant à retenir est qu'il existe actuellement une large gamme de véhicules électriques et hybrides rechargeables (Plug'In) sur le marché français et que celle-ci tend à s'étoffer d'année en année.

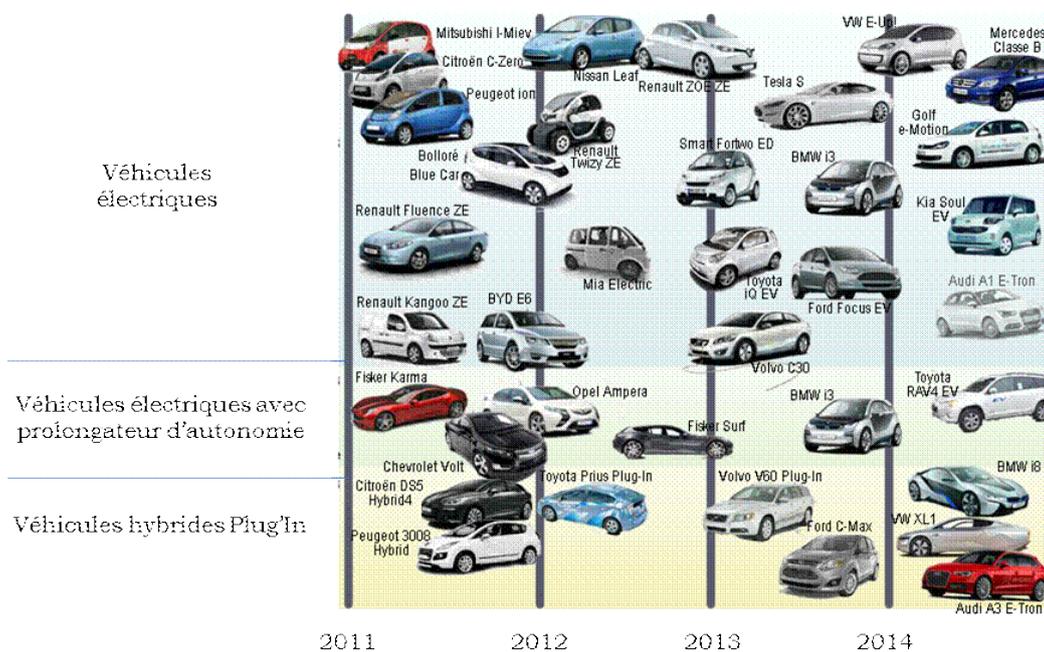


Figure I-5 : automobiles « faible » émissions présents du le marché français entre 2011 et 2014<sup>1</sup>

## I.2 Véhicules multi-sources électriques et hybrides

Dans cette partie, la notion de source employée dans ce mémoire est premièrement définie. Les différents types de sources pouvant être retrouvés dans les applications véhicules sont présentés. Le concept de systèmes multi-sources est introduit.

### I.2.1 Définitions

#### I.2.1.1 Source d'énergie

La notion de source d'énergie utilisée ici correspond à celle de la *systémique* [Astier 2012]. Selon le dictionnaire Larousse, la systémique se dit d'une approche scientifique des systèmes politiques, économiques, sociaux, etc., consistant à aborder tout problème comme un ensemble d'éléments en relations mutuelles<sup>2</sup>. Dans les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, les systèmes physiques présents dans un véhicule sont étudiés de manière systémique. Dans ce cas, les sources d'énergie correspondent à des environnements du système, imposant des variables (leurs sorties) sur celui-ci [Bouscayrol 2003]. L'idée générale est que la notion de source dépend de ce qui est considéré en tant que système. Les sources d'énergie sont classées de trois manières différentes dans ce mémoire, en fonction

<sup>1</sup> <http://www.voiture-electrique-populaire.fr> (dernière consultation mars 2016)

<sup>2</sup> <http://www.larousse.fr/> (dernière consultation en février 2016)

de la *nature de l'utilisation*, en fonction du *fonctionnement* et enfin, en fonction de la *priorité*. La *nature de l'utilisation* correspond à la nature de l'énergie que la source impose sur le système. Le *fonctionnement* correspond à la manière dont les flux d'énergie transitent dans la source (dissipation, conversion, récupération et fourniture d'énergie). La *priorité* est relative à la capacité de la source à assurer les besoins énergétiques du véhicule. Des liens existent entre les différentes classifications. Par exemple, une source agissant en tant que récepteur d'énergie (fonctionnement) sera généralement peu utilisée (priorité).

### I.2.1.2 Classification en fonction de la nature de l'utilisation

Les sources d'énergie peuvent être classées en fonction de la nature de leur utilisation. La classification n'est pas effectuée par rapport à la nature du stockage, mais par rapport à la nature de l'énergie imposée sur le système. Par exemple, une batterie d'accumulateur électrochimique possède un stockage d'énergie de nature chimique mais impose une énergie de nature électrique au système associé.

- *Sources électriques* : la source agit sur le système de manière électrique. Ce type de source imposera des courants ou des tensions sur le système. Par conséquent, un système Pile à Combustible (PàC, stockage de H<sub>2</sub>, stack et auxiliaires) qui impose une énergie sur le véhicule sous forme électrique, sera considérée comme une source électrique. De même, bien que les batteries d'accumulateurs électrochimiques (communément appelées batteries) n'assure pas un « stockage direct » de l'énergie sous forme électrique, elles seront considérées comme des sources électriques
- *Sources mécaniques* : la source agit de manière mécanique sur le système. Le système Moteur à Combustion Interne (MCI) (MCI, réservoir de carburant auxiliaires) ainsi que les freins mécaniques sont considérés comme sources mécaniques.

Cette classification n'est pas exhaustive. Par exemple des *sources thermiques* auraient pu être aussi mentionnées. Cependant, les échanges de chaleur au sein du véhicule ne sont pas considérés dans les travaux présentés dans ce mémoire. Il est à noter que cet aspect a été pris en compte dans les travaux de Ludovic Horrein [Horrein 2015b].

### I.2.1.3 Classification en fonction du fonctionnement

Trois types de sources d'énergie peuvent être définis en fonction de la manière dont l'énergie est mise en jeu :

- *Les récepteurs d'énergie* : l'énergie est convertie dans ce type de source. Il n'y pas d'apport énergétique. L'énergie qui transite exclusivement perdue. Les freins mécaniques d'un véhicule sont des récepteurs d'énergie.
- *Les générateurs d'énergie non-réversible* : l'énergie est exclusivement fournie aux éléments du système. Ce type de source ne peut pas être alimenté par les éléments du système. Par exemple, le réservoir de carburant d'un véhicule ne peut pas être renfloué en fonctionnement. C'est l'action du conducteur, (passage à la station de carburant) qui permettra d'alimenter le réservoir en énergie. Des exemples de générateurs non-réversibles sont donnés Tableau I-2.

- *Les générateurs d'énergie réversibles* : ce type de source est un générateur d'énergie ayant la capacité de se recharger de manière interne (par l'intermédiaire des éléments intrinsèques au système). Par exemple, dans un véhicule électrique, la batterie peut se recharger lors des phases de décélération du véhicule. D'autres exemples de générateurs réversibles sont donnés Tableau I-2.

#### I.2.1.4 Classification en fonction de la priorité

La troisième classification est relative à la priorité d'utilisation des sources.

- *Sources principales* : cette classe comprend deux catégories. Tout d'abord, les sources principales sont capables d'assurer la mobilité du véhicule à elles seules, pour un cycle de conduite complet. Dans un véhicule hybride « classique », le système MCI est une source principale car le véhicule peut effectuer un trajet complet avec celui-ci uniquement. En second lieu, la catégorie des sources principales comprend également les sources sans lesquelles le véhicule ne pourra pas fonctionner. Les freins mécaniques d'un véhicule sont classés dans cette catégorie car le véhicule ne peut pas effectuer un trajet complet sans ceux-ci.
- *Sources secondaires* : ces sources sont utilisées de manière ponctuelle (tampons) dans le véhicule. Une source secondaire serait par exemple une source fournissant des appels de puissance élevés de manière ponctuelle au système. Le véhicule pourrait effectuer l'essentiel de son trajet sans ces sources.

Par ailleurs, des cas où cette distinction ne peut pas être faite peuvent être envisagés. Un cas d'application pourrait être la redondance des sources dans un véhicule militaire par exemple, afin de pallier à la perte d'une source. Un second cas correspond au véhicule hybride Plug-In. En effet, dans ce type de véhicule, la batterie permet d'effectuer un trajet de plusieurs dizaines de kilomètres à elle seule.

#### I.2.1.5 Synthèse de la classification

La classification des sources est synthétisée Tableau I-2. Des sources électriques ou mécaniques peuvent avoir les différents types de fonctionnement (récepteur, générateur non-réversible, générateur réversible) et les différentes priorités (principale ou secondaire). Dans ce mémoire, le terme **Véhicule Electrique multi-source (VE multi-source)** sera employé pour un véhicule étant composé d'associations de générateurs exclusivement électriques. Le terme **Véhicule Hybride multi-source (VH multi-source)** sera employé pour un véhicule étant composé d'associations de générateurs électriques et mécaniques. Par ailleurs, l'ensemble des générateurs du véhicule sera appelé **sous-système d'alimentation** du véhicule. La dénomination des véhicules sera relative à la composition du sous-système d'alimentation. Par exemple, un véhicule à 3 générateurs de type électrique sera appelé VE à 3 sources. A noter que les sources d'énergie peuvent être contrôlées ou non. Par exemple, dans le cas du système MCI, la commande du MCI sera généralement incluse dans la source. Par conséquent, le système MCI sera considéré comme une source mécanique contrôlée en couple.

Tableau I-2: Classification des sources d'énergie dans un véhicule

Nature de l'utilisation	Fonctionnement	Exemple	Priorité
Source électrique	Récepteur	Résistance de chauffage	Secondaire
	Générateur non-réversible	Système PàC	Secondaire / Principale
	Générateur réversible	Supercondensateurs	Secondaire
Source mécanique	Récepteur	Freins mécaniques	Principale
	Générateur non-réversible	Système MCI	Secondaire / Principale
	Générateur réversible	Volant d'inertie	Secondaire

## I.2.2 Sources d'énergie et limitations

Dans cette partie, les principales sources d'énergie (telles que définies § I.2.1), utilisées dans la plupart des véhicules routiers sont énoncées. Leurs principales caractéristiques et limitations sont données.

### I.2.2.1 Batterie d'accumulateurs électrochimiques (électrique)

Les batteries d'accumulateurs électrochimiques (ou batteries), sont composées d'associations de *cellules électrochimiques* constituées de deux électrodes chacune. Par définition, chaque électrode peut être *anode* (siège d'oxydation(s)<sup>1</sup>) ou *cathode* (siège de réduction(s)<sup>2</sup>) en fonction du fonctionnement (charge ou décharge) de l'accumulateur. Les types de batteries usuels dans le domaine des transports sont ceux à base de *Plomb*, ceux à base de *Nickel* et enfin ceux à base de *Lithium*. Ces différentes dénominations sont relatives à la composition de l'électrode négative [Robert 2004], [Robert 2005a], [Robert 2005b]. Le principal inconvénient des batteries d'accumulateurs est leur durée de vie relativement faible [Devie 2012]. Cet aspect est abordé par la suite.

### I.2.2.2 Supercondensateur (électrique)

Dans les Supercondensateurs (SCs), l'énergie est stockée de manière électrostatique. Un SC électrostatique est composé de deux électrodes constituées de matériaux poreux (généralement poudre de carbone), d'un électrolyte solide assurant la conduction ionique, d'un séparateur permettant l'isolation galvanique des deux électrodes, et de collecteurs de courant [Gualous 2007]. Les SCs ont une densité de puissance particulièrement élevée. De plus, leur durée de vie est plus importante que celle d'une batterie conventionnelle (dizaines de milliers de cycles pour une batterie contre 500 milles pour des SCs) [Akinyele 2014].

### I.2.2.3 Système Pile à combustible (électrique)

La pile à combustible (PàC) est basée sur le processus inverse de l'électrolyse de l'eau. De l'électricité est produite à partir d'hydrogène et d'oxygène. Le fonctionnement de la

<sup>1</sup> En électrochimie une réaction d'oxydation correspond à une perte d'électrons

<sup>2</sup> Gain d'électrons

PàC est régi par une réaction de *combustion*<sup>1</sup> mettant en jeu l'hydrogène (ou un composé d'hydrogène) comme combustible et l'oxygène comme comburant. Le siège de la réaction (convertisseur d'énergie) est appelée *stack*. Il existe plusieurs types de PàCs classées en fonction de la nature de l'électrolyte, du type de combustible utilisé, ainsi que de la température de fonctionnement [Stevens 2000], [Lefebvre-Joud, 2011]. La PàC la plus utilisée dans les applications automobiles est celle de type PEMFC<sup>2</sup>. Elle garantit entre autres une mise rapide en opération et des températures de fonctionnement peu élevées (entre 50 °C et 100 °C). Le système PàC permet d'obtenir un rendement global supérieur au système MCI (entre 40 % et 60 %). Par ailleurs, elle comporte des inconvénients pour les applications automobiles. Son coût relativement élevé et sa faible durée de vie conduisent à restreindre son utilisation aux applications stationnaires [Xueqin 2009], [CEA 2012]. Cependant, des constructeurs automobiles « majeurs » ont développé des véhicules utilisant ce système. Il y a notamment Toyota qui a lancé un véhicule PàC sur le marché (Toyota Mirai) en 2015.

#### I.2.2.4 Système Moteur à combustion interne (mécanique)

Le moteur à combustion interne est un élément de conversion d'énergie, qui transforme l'énergie chimique d'un carburant en énergie thermique. L'énergie thermique est ensuite utilisée pour fournir un travail mécanique [Ganesan 2006]. Il existe deux grands types de MCI utilisés dans les applications automobiles, les moteurs de type « essence » et les moteurs « Diesel ». Le système MCI est caractérisé par un rendement maximal relativement faible (~40 % pour des moteurs performants de type Diesel) [Taylor 2008].

#### I.2.2.5 Volant d'inertie (mécanique)

Un système de stockage d'énergie par volant d'inertie consiste à emmagasiner de l'énergie par l'intermédiaire d'une masse tournante. Dans un système de stockage d'énergie électrique par volant d'inertie, le volant est freiné et accéléré par une machine électrique fonctionnant respectivement en moteur et générateur [Cross 2008], [Multon 2013]. Les volants d'inertie offrent des caractéristiques intéressantes telles qu'une grande durée de vie, ainsi que la possibilité de restituer de grandes quantités d'énergie en très peu de temps (puissance spécifique).

#### I.2.2.6 Air comprimé (mécanique)

Cela consiste à stocker de l'air comprimé et à le détendre ensuite dans un moteur à air comprimé. Le concept a été lancé en 2000 par deux entreprises, Motor Development International (MDI) et Energin. En janvier 2013, PSA Peugeot Citroën a présenté son prototype baptisé « Hybrid Air », véhicule hybride léger fonctionnant avec un moteur thermique (essence) et un moteur hydraulique [PSA 2013].

---

<sup>1</sup> Réaction chimique exothermique d'oxydoréduction. Il y a un oxydant (souvent l'O<sub>2</sub>) étant le comburant et un réducteur (combustible) pouvant contenir du carbone (carburant)

<sup>2</sup> Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

### I.2.2.7 Comparaison des différents systèmes

Les sources d'énergie présentées précédemment sont comparées par l'intermédiaire d'un diagramme de Ragone (Figure I-6).

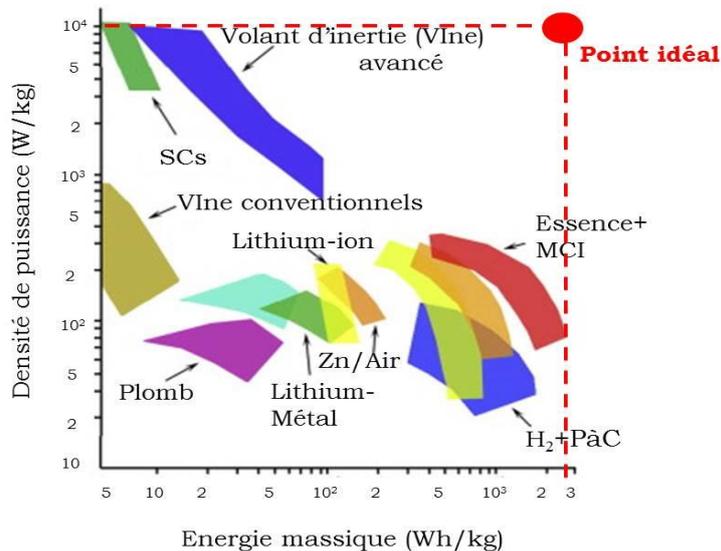


Figure I-6 : diagramme de Ragone (inspiré de [Ghoniem 2011])

Le diagramme de Ragone représente les caractéristiques d'une source d'énergie dans le plan puissance massique - énergie massique [Christen 2000]. La source « idéale » serait celle ayant une importante énergie massique, tout en ayant un niveau élevé en termes de puissance massique (point idéal Figure I-6). Cependant, aucune des sources présentées ne remplit les deux critères à la fois. Les SCs possèdent par exemple, un niveau de puissance massique élevé, mais ont une énergie massique relativement faible. C'est le phénomène inverse qui se produit dans le cas de la PàC. Un tableau comparatif des différentes sources est donné [Simon 2011], [CEA 2012], [Tan 2013], [Akinyele 2014], [Chatroux 2015]. Des critères de durée de vie et de coût sont instaurés. Les données sont à relativisées car elles sont issues de plusieurs références plus ou moins récentes. Le point essentiel à retenir est que la source répondant à tous les critères n'existe pas. Chaque source comporte des points forts ainsi que des caractéristiques moins intéressantes (performances moindres, coût élevé). Les batteries d'accumulateurs électrochimiques sont limitées essentiellement par leur durée de vie et leur puissance spécifique. Les SCs n'ont pas ce problème mais ne permettent pas d'emmagasiner un niveau d'énergie élevé à masse et encombrement raisonnables pour une application véhicule. Les carburant fossiles associés au système MCI sont viables, mais leur utilisation doit être réduite dans la conjoncture actuelle de fluctuation des cours du pétrole, et d'apparition de normes de plus en plus strictes concernant la réduction des émissions polluantes (cf. enjeux des véhicules du futur § I.1.1). Les systèmes *multi-sources* consistent à associer différentes sources afin de se prévaloir des avantages de chacune.

Tableau I-3 : tableau comparatif entre les différentes sources d'énergie

Source	Energie massique (Wh/kg)	Densité de puissance (W/kg)	Dur. Vie (nbre cycles)	Coût (€/kW)	Coût (€/kWh)
<b>Batterie</b>	20 - 200	25 - 2 k	< 5 k	8 - 300	150 - 1,5 k
<b>SC</b>	< 20	> 10 k	> 500 k	20 - 40	8 k - 15 k
<b>Système MCI</b>	< 12 k	<5 k (MCI)	-	-	
<b>Système PàC</b>	< 2 k	<1,5 k	> 1 k	> 500	
<b>Volant d'inertie</b>	10 - 100	<10 k	< 100 k	200 - 300	800 - 4 k

### I.2.3 Systèmes multi-sources

La partie suivante traite des associations électriques et électriques-mécaniques de générateurs d'énergie. Dans le cas d'associations électriques-mécaniques de sources, le terme d'association hybride sera employé.

#### I.2.3.1 Associations électriques

Il existe deux grands types d'associations de sources électriques dans les applications véhicules [Chan 2010], [Khaligh 2010], [Allègre 2010b], [Song 2015a], [Trovão 2015a]:

- *Association passive* : l'association passive consiste à connecter directement les sources entre elles (Figure I-7.a). Le principal avantage de cette architecture est sa simplicité de mise en œuvre et son coût réduit. Cependant, la puissance transitant à travers les sources ne peut pas être contrôlée. La répartition des flux d'énergie entre les sources se fait par l'intermédiaire des éléments intrinsèques des sources (résistance interne...). Par conséquent, leur utilisation ne peut pas être optimisée.
- *Association active* : les sources sont connectées entre elles par l'intermédiaire de convertisseurs statiques. Deux cas de figures peuvent être retrouvés. La tension du bus continu peut être directement imposée par une des sources (Figure I-7.b), ou toutes les sources peuvent être interfacées par un convertisseur DC-DC. Par ailleurs, les sources peuvent être connectées en série (association en cascade, Figure I-7.d) ou en parallèle (Figure I-7.c). L'association des convertisseurs en cascade est moins intéressante en termes de rendement que celle en parallèle. En effet, la puissance peut être amenée à transiter par tous les convertisseurs, même dans le cas de l'utilisation d'une seule des sources.

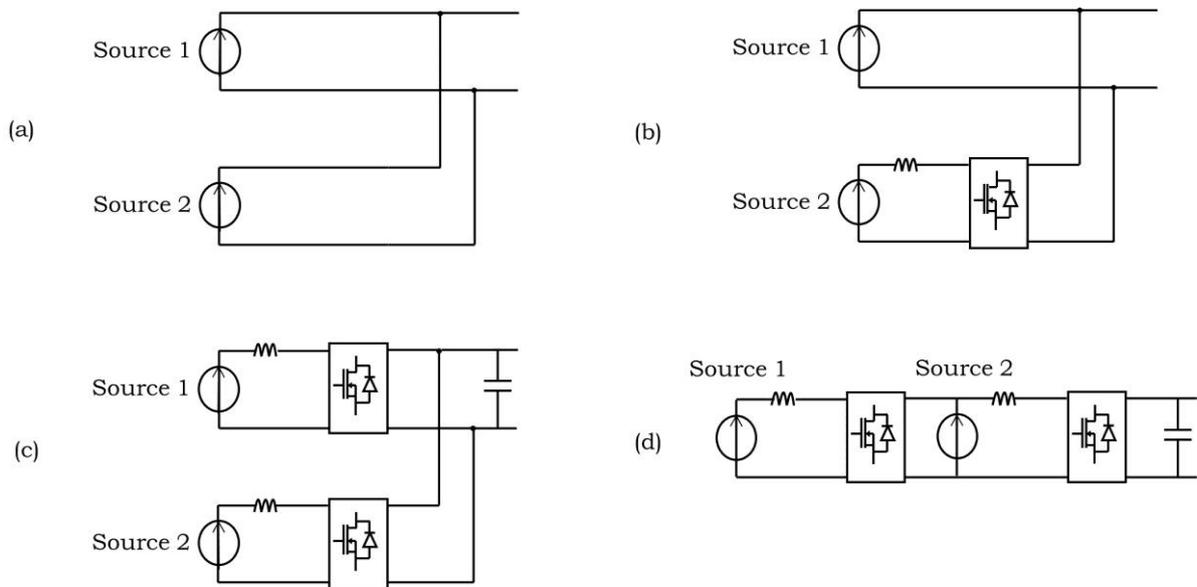


Figure I-7 : exemple d'association active de deux sources électriques, (a) en parallèle, (b) en cascade

### I.2.3.2 Associations électriques-mécaniques

Les associations de sources électriques et mécaniques concernent les véhicules communément appelés Véhicules Hybrides (VHs) ou Véhicules Electriques Hybrides (VEHs). La répartition des flux d'énergie entre les sources peut se faire par un nœud de puissance mécanique (association hybride parallèle), par un nœud de puissance électrique (association hybride série) ou bien par les deux types de nœuds de puissance (association hybride série-parallèle). Ces différentes architectures sont présentées Figure I-8 avec la dénomination « ME » pour Machine Electrique.

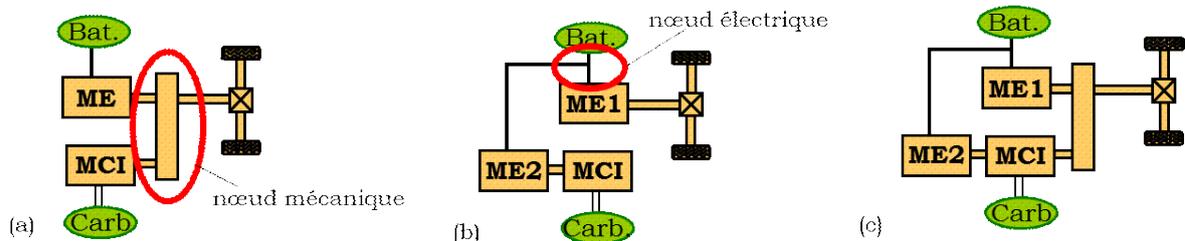


Figure I-8 : architectures de VHs « conventionnels », (a) parallèle, (b) série, (c) série-parallèle

## I.3 Gestion d'énergie de systèmes multi-sources

Les principaux systèmes multi-sources utilisés (ou envisagés) pour les applications véhicules ont été présentés précédemment. Ce sont des systèmes complexes. Mis à part les types d'associations, la grande problématique relative à ces systèmes est leur commande.

## I.3.1 Organisation de la commande

### I.3.1.1 Généralités

Un véhicule multi-source nécessite l'introduction de nouvelles fonctions dans la gestion d'énergie, par rapport à un véhicule conventionnel. En effet, chaque convertisseur d'énergie nécessite une commande spécifique. Le schéma général de la commande d'un véhicule multi-source est représenté Figure I-9. Deux niveaux de commande peuvent être distingués [Bouscayrol 2003], [Trigui 2011]:

- *Commande globale* : les ordres du conducteur sont interprétés, pour envoyer les références aux différents composants du véhicule, via un bus de communication. La commande globale est également appelée supervision ou gestion d'énergie.
- *Commande locale* : les références des grandeurs demandées, sont traduites en signaux utiles, pour la commande rapprochée des convertisseurs de puissance [Francois 2003].

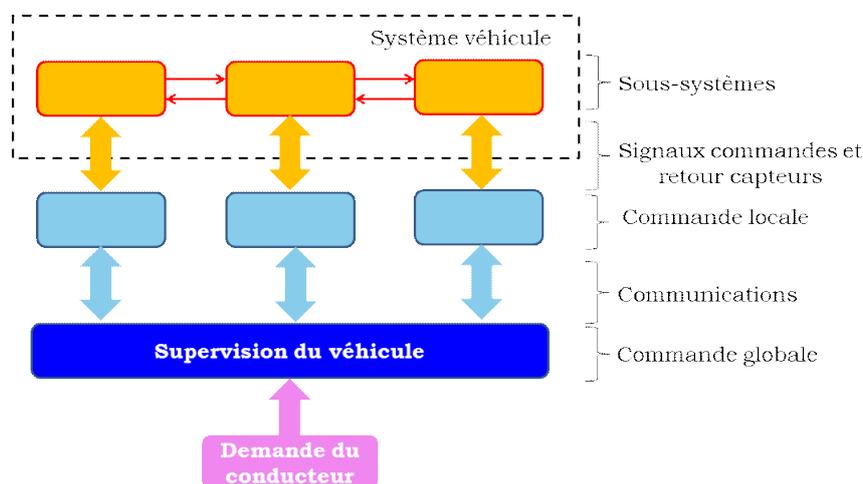


Figure I-9 : organisation de la commande d'un véhicule multi-source (inspirée de [Trigui 2011])

### I.3.1.2 Outil de structuration de la commande : Représentation Energétique Macroscopique

Le principe de l'organisation de la commande d'un véhicule multi-source a été présenté dans la partie précédente (cf. Figure I-9). La Représentation Energétique Macroscopique (REM) est un outil graphique permettant de structurer la commande d'un système de manière systématique. Les niveaux de commandes présentés précédemment (Figure I-9) y sont clairement mis en évidence. La REM est basée sur le principe d'action-réaction, pour représenter les différentes interconnexions entre les différents sous-systèmes. C'est un outil basé sur la causalité physique (causalité intégrale) [Bouscayrol 2003], [Lhomme 2014]. La première étape consiste à modéliser le système. Les différents pictogrammes utilisés sont associés aux modèles des éléments du système. L'exemple d'une Machine à Courant Continu (MCC) alimentée par un convertisseur DC-DC est donné Figure I-10. Le modèle du

bus DC est représenté par un élément de source (ovale vert). Le modèle du convertisseur DC-DC est représenté par un élément de conversion d'énergie mono-domaine (carré orange). Le modèle du bobinage de l'induit de la machine est représenté par un élément d'accumulation d'énergie (rectangle orange barré), qui correspond à une relation de causalité (intégrale). L'élément rond orange correspond à une conversion d'énergie multi-domaine (ici électromécanique). La structure de commande (commande locale, cf. § I.3.1.1) est déduite directement par effet « miroir » de la REM en appliquant le principe d'inversion de modèles (éléments bleu ciel). La stratégie correspond à la commande globale du système (bleu foncé). Contrairement à la commande locale, la définition de la structure de la stratégie n'est pas systématique. Les différents pictogrammes de la REM sont présentés en Annexe A. La REM et la structure de commande de véhicules multi-sources ont été réalisées dans le cadre du réseau MEGEVH, qui sera présenté par la suite [Lhomme 2007], [Boulon 2009], [Chen 2010], [Allègre 2010b], [Syed 2012], [Letrouvé 2013].

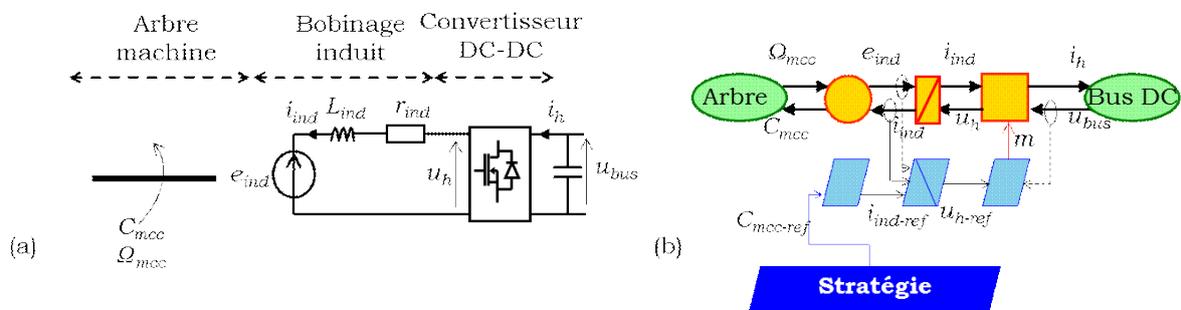


Figure I-10 : MCC et convertisseur DC-DC, (a) structure, (b) REM et structure de commande

### I.3.1.3 Organisation de la commande de sources d'énergie

Dans un véhicule multi-source, chaque source du sous-système d'alimentation en énergie a un objectif associé. Ces objectifs sont liés aux différentes classifications présentées dans la partie précédente (cf. § I.2.1). Tout d'abord, il faut distinguer les objectifs *internes* des sources ainsi que l'objectif *global* associé à l'ensemble.

- *Objectifs internes* : ce sont les objectifs de la source considérée, par rapport aux autres sources. Un objectif interne d'une source A pourrait être d'augmenter la durée de vie d'une source B, en limitant les sollicitations qui lui sont imposées. Les objectifs internes des sources traduisent le but de l'association des sources entre elles.
- *Objectif global* : ce sont les objectifs de l'ensemble des sources (sous-système d'alimentation) d'un point de vue global (à l'échelle du système). L'objectif global du sous-système d'alimentation d'un véhicule multi-source, est de fournir/récupérer la puissance appelée par la transmission mécanique du véhicule, pour que celui-ci puisse se mouvoir.

Cette notion d'objectifs est particulièrement importante. En effet, cela veut dire que des sources peuvent être rassemblées en sources équivalentes. Par exemple, si la source A et la source B possèdent des objectifs internes communs, elles peuvent être rassemblées avec leur commande associée, et constituer une source équivalente contrôlée. Cela est illustré Figure I-11 avec les sources A et B étant des sources contrôlées, et la source C étant une

source non contrôlée. Ce principe sera utilisé dans les travaux relatifs à cette thèse. A noter qu'une source seule peut être regroupée avec des éléments de conversion d'énergie associés (avec leur commande), afin de créer une source équivalente contrôlée ou non. Cette source aura une commande interne indépendante de celle du reste du système. Cela est illustré Figure I-12 par l'exemple de la machine à courant continu associée à convertisseur DC-DC. Le regroupement de l'ensemble devient une source de couple non contrôlée car la stratégie est dans la source équivalente.

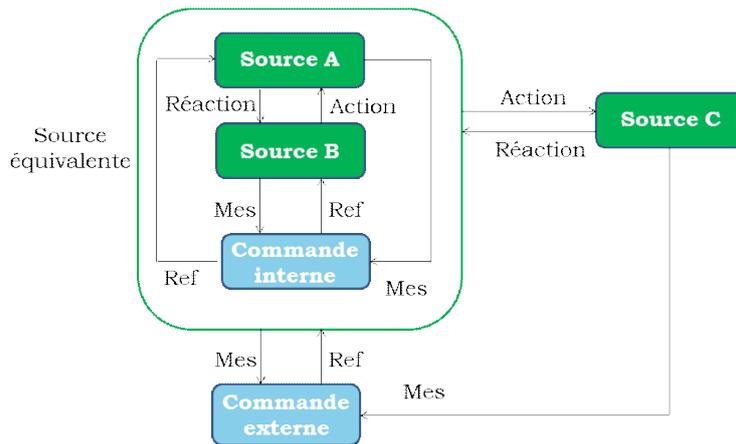


Figure I-11 : regroupement en fonction des objectifs

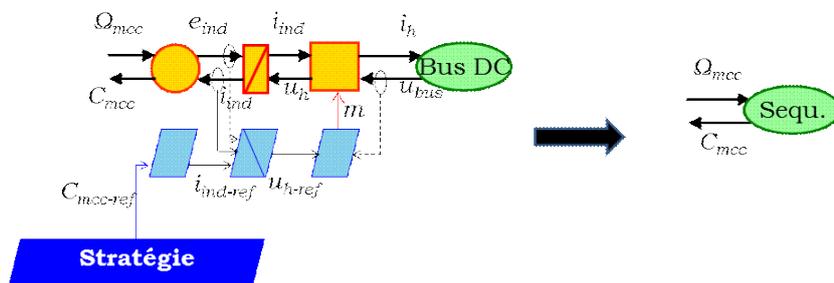


Figure I-12 : regroupement d'une source et des convertisseurs associés

### I.3.1.4 Stratégies de gestion d'énergie

La stratégie de gestion d'énergie (ou stratégie), correspond à la manière dont la commande globale du système est réalisée. La stratégie de gestion d'énergie peut être basée sur deux approches [Koot 2005], [Salmasi 2007], [Wirasingha 2011], [Guzzella 2013a] (Figure I-13) :

- *Stratégies à base de règles* : ce sont des stratégies basées sur l'expérience du concepteur. Par leur nature, ce type de stratégie ne permet pas de garantir l'optimalité vis-à-vis d'un critère de performances. Cependant, ces stratégies ont l'avantage d'être directement implantables en temps réel. Par ailleurs, il y a deux catégories de stratégies à base de règles, les stratégies à base de règles *déterministes* et les stratégies à base de règles *floues*.

- *Stratégies à base d'optimisation* : ces stratégies sont basées sur le principe de la commande optimale. La commande optimale consiste à faire évoluer un système de manière à minimiser (ou maximiser) un critère de performances. Les stratégies à base d'optimisation peuvent être classées en deux catégories, les stratégies *hors ligne* à base d'optimisation ainsi que les stratégies *temps réel* à base d'optimisation.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse sont essentiellement orientés autour des stratégies temps réel à base d'optimisation.

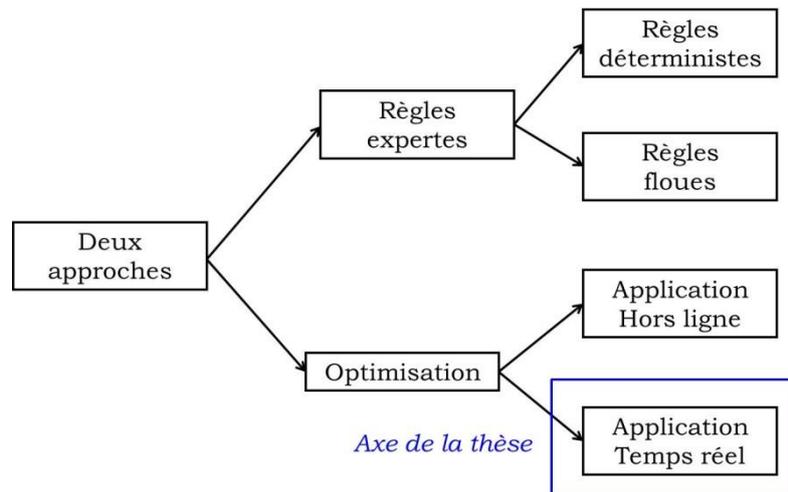


Figure I-13 : différents types de stratégies de gestion d'énergie

## I.3.2 Stratégies de gestion d'énergie à base de règles expertes

Des exemples de stratégies à base de règles expertes utilisées dans les véhicules multi-sources sont donnés dans cette partie.

### I.3.2.1 Stratégie de filtrage

Cette stratégie consiste à imposer à chaque source du véhicule, une partie des dynamiques de la puissance appelée par la chaîne de traction (ou propulsion) [Turpin 2012]. C'est une stratégie particulièrement répandue dans le domaine des véhicules multi-sources. Cette stratégie a été utilisée pour des VE multi-sources batterie/SCs (2 sources) dans une forme basique [Tani 2012], [Allègre 2013] ou plus évoluée (fréquence adaptative) [Florescu 2015]. Dans le cas des VE batterie-SCs, l'objectif est que la batterie fournisse les « basses » fréquences de la puissance de traction, et les SCs le reste (Figure I-14). La batterie fournit idéalement la puissance moyenne du cycle de conduite. Par conséquent, la puissance moyenne des SCs est nulle dans le cas idéal. Le filtrage a également été utilisé pour des véhicules PàC-SCs [Azib 2010b]. Par ailleurs, cette stratégie a été aussi implantée dans le cas de VE à trois sources (PàC-batterie-SCs dans [Thounthong 2009b], [Azib 2014]) et aussi des VHs à 3 et 4 sources [Akli 2008], [Jaafar 2009].

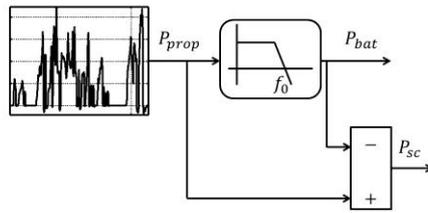


Figure I-14 : principe de la stratégie de filtrage pour un VE batterie-SCs

### I.3.2.2 Autres stratégies

D'autres types de stratégies à base de règles (plus ou moins complexes) ont été employés dans des travaux précédents sur les véhicules multi-sources. Il y a par exemple la stratégie « thermostat », utilisée dans le cadre de VHs batterie-MCI [Delprat 2002b], [Ehsani 2005]. Des stratégies à base de règles floues ont été utilisées pour des VE à deux sources [He 2013], des VE à trois sources [Gao 2008], [Zandi 2011], [Solano-Martinez 2011], [Li 2012] et des VHs [Poursamad 2008].

## I.3.3 Stratégies de gestion d'énergie à base d'optimisation

### I.3.3.1 Synthèse d'une stratégie à base d'optimisation

La synthèse d'une stratégie à base d'optimisation se réalise en deux étapes :

- *Formulation du problème de commande optimale* : cette étape consiste entre autres à définir les différentes variables qui interviennent dans le problème de commande optimale (avec les contraintes associées) et les critères de performances à minimiser (ou maximiser). Par exemple, dans le cas d'un VH MCI-batterie, le critère de performance à minimiser sera généralement la consommation de carburant. En ce qui concerne les variables à prendre en compte, l'état de charge de la batterie sera considéré comme une variable d'état. Une variable de commande pourra être le couple de référence du MCI. Le choix de ces différentes variables n'est pas systématique. L'un des objectifs des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, consiste à aider à la définition des variables de commande du problème de commande optimale de manière structurée. De plus amples détails sur cet aspect seront donnés dans la partie suivante (cf. § I.3.3) et dans le prochain chapitre (Chapitre II).
- *Résolution du problème de commande optimale* : la résolution du problème consiste à définir la sortie appropriée de la stratégie (variable de commande), afin de minimiser (ou maximiser) le critère de performances. Les stratégies à base d'optimisation sont généralement différenciées en fonction de la méthode de résolution utilisée.

### I.3.3.2 Méthodes de résolution hors ligne

Les méthodes de résolution hors ligne nécessitent la connaissance du cycle de conduite *a priori*. Elles sont dès lors réservées à la simulation. Cependant, elles peuvent servir de référence pour l'évaluation des performances du véhicule, d'aide au dimensionnement [Hung 2012] ou encore, d'aide à la synthèse de stratégies temps réel [Chen 2014], [Song 2015b],

[Berkel 2015], [Horrein 2015b]. Les méthodes de résolution peuvent être classées en deux catégories [Kermani 2009], [Guzzella 2013b] :

- *Méthodes heuristiques* ou *méta-heuristiques* : ces méthodes sont basées sur un « modèle de comportement » du système. La structure et les paramètres d'un modèle de comportement n'ont pas de rapport avec le système réel. Ce sont des modèles obtenus expérimentalement en exploitant des mesures entrées-sorties. Le fonctionnement interne du système n'est pas considéré [Abdenour 2001]. Les méthodes *heuristiques* ou *méta-heuristiques* fonctionnent généralement de manière itérative et stochastique. Les algorithmes utilisés peuvent s'appuyer sur des processus physiques. Par exemple, la méthode du *recuit simulé* s'inspire d'un processus métallurgique, qui consiste à imposer un refroidissement contrôlé à une pièce métallique, ayant suivi un cycle de chauffage au préalable. C'est une méthode de résolution qui est appliquée dans le cadre de plusieurs problèmes de commande optimale, et ce depuis plusieurs années [Kirkpatrick 1984]. Cependant, ce type de méthodes de résolution ne garantit pas la convergence vers un optimum global. Un autre inconvénient concerne le temps de calcul souvent prohibitif [Scordia 2004]. La méthode du recuit simulé a été utilisée pour la gestion d'énergie d'un VE batterie-SCs dans [Trovão 2013]. Par ailleurs, d'autres types de méthodes méta-heuristiques comme les *algorithmes génétiques* [Yu 2011], ou encore l'optimisation par *essais particuliers* [Trovão 2015c], [Trovão 2015b] ont été utilisées dans les véhicules multi-sources.
- *Méthodes exactes* : les méthodes exactes sont basées sur un « modèle de connaissance » du système. Les paramètres d'un modèle de connaissance représentent les grandeurs caractéristiques de la structure étudiée. Les modèles de connaissance sont basés sur des lois physico-chimiques. Ce type de modèle, basé sur la physique du système, peut s'avérer complexe à caractériser dans certains cas [Abdenour 2001]. Les méthodes *exactes* consistent à trouver des solutions explicites au problème de commande optimale. La résolution peut se faire de manière analytique ou numérique. La méthode analytique principalement utilisée dans la gestion d'énergie des véhicules multi-sources, utilise le *Principe du minimum de Pontriaguine* (PMP) [Pontriaguine 1974], [Culioli 1994], [Kirk 2004], [Becerra 2011], [Bourdin 2013]. La méthode du minimum de Pontriaguine a été appliquée sur des VE [Vinot 2010] et des VHs [Delprat 2004], [Yuan 2013], [Vinot 2013]. C'est une méthode qui présente l'avantage de nécessiter un temps de calcul relativement limité. La méthode de résolution numérique la plus utilisée dans les applications véhicules, est celle de la *programmation dynamique*. C'est une méthode basée sur le *principe d'optimalité de Bellman* [Bellman 2003]. Cette méthode est très performante mais nécessite des efforts de calcul très importants. La programmation dynamique a été appliquée pour différents véhicules multi-sources, dans sa forme de base [Scordia 2005], [Chen 2014] ou dans une forme plus évoluée [Kim 2007].
- *Avantages et inconvénients* : les méthodes méta-heuristiques ont l'avantage de ne pas nécessiter de modèle de connaissance du système (caractérisation). Cependant, la convergence vers l'optimum (qualité de la solution) n'est pas assurée. Les méthodes

de résolution exactes ont l'inconvénient de nécessiter un modèle de connaissance du système. Les méthodes exactes numériques permettent de s'assurer d'un optimum global de la solution et du respect des contraintes imposées. L'inconvénient majeur de ce type de méthode est le temps de calcul pouvant être très important. Les méthodes exactes de type analytique permettent de réduire le temps de calcul nécessaire en comparaison aux méthodes numériques. Le gros inconvénient est la prise en compte des contraintes inégalités qui n'est pas évidente. Les avantages et inconvénients des méthodes de résolution hors ligne sont résumés Tableau I-4.

Tableau I-4 : avantages et inconvénients des méthodes de résolution hors ligne

Catégorie	Qualité solution	Nécessité modèle de connaissance	Prise en compte contraintes inégalités	Temps de calcul
Méta-heuristique	<i>Pas assurée</i>			
Exacte numérique	  		 	
Exacte analytique	 			

### I.3.3.3 Stratégies temps réel à base d'optimisation

Divers travaux ont été effectués dans le but de réaliser des stratégies à base d'optimisation pouvant être implantables et performantes en temps réels. Les stratégies à base d'optimisation temps réel sont sous-optimales. Par conséquent, l'objectif est de se rapprocher le plus possible de cet optimum global. Les stratégies à base d'optimisation temps réel doivent faire face à deux problématiques, la non connaissance des conditions de conduites *a priori* (prédiction) et l'implantation en temps réel (temps de calcul limité) qui doit être possible. Les approches présentées par la suite sont orientées autour de ces deux problématiques.

#### Commande prédictive

La commande prédictive de type MPC (Model-Predictive Control), consiste à estimer les conditions de conduite futures du véhicule, à partir du modèle du système sur un horizon de temps déterminé [Olaru 2005]. Ce type de commande a été utilisé dans plusieurs travaux sur les véhicules multi-sources [Gong 2008], [Hredzak 2014], [Santucci 2014]. Une comparaison de la commande de type MPC avec des stratégies à base de règles (filtrage, logique floue) a été réalisée dans [Song 2014] pour un VE batterie-SCs. Dans cette étude, la commande MPC s'est avérée moins performante que les stratégies à base de règles utilisées.

#### Adaptation de méthodes d'optimisation hors ligne pour le temps réel

Ce type de stratégie utilise les principes de méthodes de résolution hors ligne. Cependant, certains aspects sont adaptés pour le fonctionnement en temps réel. La méthode de l'*Equivalent Consumption Minimisation* (ECMS) est dérivée du PMP. Celle-ci consiste à minimiser une somme pondérée de puissances [Paganelli 2001], [Sciarretta 2007], [Guzzella 2013a]. L'ECMS a été utilisé dans plusieurs travaux sur les véhicules

multi-sources [García 2012], [Han 2014]. La méthode du  $\lambda$ -control est également dérivée du PMP. Elle consiste à adapter le paramètre clé de la méthode de résolution (multiplicateur de Lagrange), par l'intermédiaire d'une boucle d'asservissement [Delprat 2002b], [Kessels 2007], [Kessels 2008]. Le gros avantage des méthodes dérivées du PMP est leur applicabilité en temps réel (temps de calcul). La connaissance *a priori* des conditions de conduite est un aspect qui reste à l'étude, en dépit de certains éléments qui ont été développés pour faire face à cette problématique [Kermani 2009]. Plus de détails seront donnés Chapitre II sur l'ECMS et le  $\lambda$ -control par la suite, car ce sont les méthodes de résolution qui ont été utilisées dans le cadre des travaux relatif à cette thèse.

### **Synthèse d'une stratégie à base de règles à partir d'optimisation hors ligne**

Plus récemment, des travaux ont été réalisés sur la synthèse de stratégies à base de règles, à partir de résultats obtenus hors ligne, avec des stratégies à base d'optimisation. Cela a notamment été réalisé par l'intermédiaire de la programmation dynamique [Chen 2014], [Song 2015b], [Berkel 2015], [Horrein 2015b], [Zhang 2015]. Dans ces travaux, l'idée était de définir des règles à partir des résultats obtenues avec la programmation dynamique. Une autre approche consiste à définir une base de connaissances à partir d'une méthode d'optimisation hors ligne. Cette base de connaissances peut être développée par l'utilisation de réseaux de neurones. Les réseaux de neurones reproduisent les résultats correspondant aux situations proches de celles rencontrées lors de la phase d'apprentissage. Ce principe a été notamment développé dans [Scordia 2004].

### **Stratégies « hybrides »**

Les stratégies « hybrides » consistent à utiliser les deux approches (règles et optimisation) en parallèle. Par exemple, dans [Trovão 2013] et [Trovão 2015c], une stratégie à base de règle a été utilisée afin de réduire l'espace de recherche de solutions d'une méthode de résolution de type méta-heuristique. Cela a permis d'une part de réduire le temps de calcul nécessaire à la stratégie, et d'autre part de prendre en compte les contraintes du problème de manière aisée. Une stratégie à base de règles a donc été utilisée en tant qu'aide à la synthèse d'une stratégie à base d'optimisation. Des travaux sur l'idée de stratégies hybrides ont été réalisés au L2EP. Dans une application véhicule hybride parallèle, certains éléments ont été gérés par l'intermédiaire de la programmation dynamique et d'autres par des règles [Horrein 2015b].

## **I.3.4 Limitations des approches utilisées**

### **I.3.4.1 Performances des stratégies à base de règles**

Les stratégies à base de règles ont un avantage indéniable qui est leur applicabilité. En effet, une stratégie à base de règles ne pose pas de problèmes de temps de calcul. Cependant, l'inconvénient majeur est qu'elles ne permettent pas d'assurer des objectifs prédéfinis (c.à.d. critère de performances). Cependant, dans certains cas, ces stratégies

peuvent s'avérer avoir des performances équivalentes aux stratégies à base d'optimisation (variation des conditions de conduite, saturation d'une des sources [Castaings 2016]).

#### I.3.4.2 Applicabilité des stratégies à base d'optimisation

Les stratégies à base d'optimisation permettent d'assurer (ou d'approcher) un objectif fixé pour le système. Cela se traduit par la minimisation (ou maximisation) d'un critère de performances. Cependant, un problème majeur est l'application en temps réel. En effet, les méthodes les plus performantes nécessitent des temps de calculs trop importants. De plus, une stratégie à base d'optimisation n'est performante qu'avec la connaissance des conditions de conduite du véhicule *a priori*. Par ailleurs, des méthodes « temps réel » ont été développées pour palier à ces problématiques (cf. § I.3.3.3). Leurs performances ne sont cependant pas assurées. En effet, ces stratégies sont *sous-optimales*. D'autre part, la synthèse des stratégies (issues des deux approches) reste une problématique majeure. Ce point est abordé dans la partie suivante.

#### I.3.4.3 Problématique commune : synthèse des stratégies

##### **Stratégies à base de règles**

En prenant l'exemple des stratégies à base de règles présentées dans la partie précédente (cf. § I.3.2), la difficulté de la détermination des paramètres peut être mise en évidence. Par exemple, en ce qui concerne le filtrage, la fréquence de coupure adéquate du filtre doit être définie. Dans [Florescu 2015], une stratégie de filtrage avec une fréquence de coupure adaptative, a été définie pour un VE batterie-SCs. La problématique de la détermination des paramètres adéquats se retrouve aussi dans le cas des stratégies à base de règles floues. En effet, il faut pouvoir notamment déterminer la base de connaissance qui contient les définitions des fonctions d'appartenance des variables.

##### **Stratégies à base d'optimisation**

*Formulation de problème* - La première étape dans la synthèse d'une stratégie à base d'optimisation est la *formulation* du problème de commande optimale (cf. § I.3.3.1). La réalisation de cette étape est loin d'être systématique. En effet, pour un même système ayant les mêmes objectifs, plusieurs formulations peuvent être recensées, en particulier au niveau du choix des variables de commande. Par exemple, dans le cas d'un VE batterie-SCs avec un seul convertisseur DC-DC, le ratio entre la puissance de la batterie et celle des SCs a été choisi comme variable de commande dans [Hung 2012]. Pour le même système, la puissance aux bornes des SCs a été choisie comme variable de commande dans [Song 2015b]. Dans [Choi 2014], quatre grandeurs, la puissance aux bornes de la batterie, la puissance aux bornes des SCs, la puissance à la sortie du convertisseur DC-DC ainsi que l'énergie aux bornes des SCs ont été considérées comme variables de commande. Dans [Bernard 2009], le courant de la PàC a été choisi comme variable de commande pour un VE PàC-SCs. C'est la puissance de la PàC qui a été choisie pour le même système dans [Lin 2011]. Dans [Naiff da Fonseca 2013], la puissance de la batterie a été choisie en tant que variable de commande pour un véhicule PàC-batterie avec un seul convertisseur. Pour la

même architecture PàC-batterie, le courant de la PàC a été retenu en tant que variable de commande dans [Kim 2007]. Ce manque d'uniformité dans le choix des variables de commande se retrouve aussi dans les véhicules à trois sources. Par exemple, dans [Yu 2011] un système PàC-batterie-SCs a été décomposé entre une source équivalente batterie-SCs et la PàC (cf. Figure I-11). La puissance de la PàC (au niveau du bus DC) a été définie comme variable de commande pour le système PàC-source équivalente. Les puissances de la batterie et des SCs ont été définies comme variables de commande pour la gestion interne de la source équivalente. Le même système PàC-batterie-SCs a été géré de manière globale dans [García 2012]. Les puissances aux bornes de la batterie et des SCs ont été retenues comme variables de commande. Dans le cas d'un VH MCI-batterie-SCs de type parallèle, le couple de la machine électrique ainsi que la puissance de la batterie ont été choisies comme variables de commande dans [Santucci 2014]. Les puissances de la batterie et des SCs ont été utilisées comme variables de commande pour un VH parallèle MCI-batterie-SCs dans [Vinot 2013]. Ainsi, le choix des variables de commande est fait de manière heuristique et est loin d'être systématique.

Toujours dans l'étape de formulation, dans l'application de méthodes de résolution exactes, il est nécessaire de pouvoir définir un modèle réduit du système de type statique ou quasi-statique afin de pouvoir faciliter l'étape de résolution du problème [Guzzella 2013b]. Par exemple, pour un VE batterie-SCs avec un seul convertisseur, dans le cas de l'application d'une méthode de programmation dynamique, le convertisseur DC-DC (avec la bobine de lissage), la transmission mécanique et la machine électrique ont été modélisés par un rendement global dans [Song 2015b]. De même, pour un véhicule PàC-SCs avec deux convertisseurs, les convertisseurs DC-DC (et les bobines associées) ont été modélisés par l'intermédiaire de rendements globaux dans [Lin 2011]. Aussi, pour un véhicule à trois sources MCI-batterie-SCs, la transmission mécanique du véhicule et les convertisseurs d'électronique de puissance (avec les bobines associées) ont été modélisés par l'intermédiaire de rendements globaux dans [Zhang 2015] pour synthétiser la stratégie de gestion d'énergie. La modélisation des convertisseurs d'électronique de puissance (et des bobines de lissage associées) par l'intermédiaire de rendement globaux a également été réalisée dans le cas d'un VH série MCI-batterie-SCs dans [Ko 2015]. Or, le modèle réduit doit pouvoir respecter les propriétés physiques du système. Il doit notamment représenter les relations entre les différentes variables intervenant dans le problème. La détermination de ce modèle réduit représente par conséquent une problématique importante dans la formulation du problème de commande optimale. En dépit de l'importance de cet aspect, les méthodes de détermination des modèles réduits ne sont généralement pas explicitées dans la littérature.

La dernière problématique, et non des moindres dans l'étape de formulation, est la définition du critère de performances à minimiser. En effet celui-ci se doit d'être le plus pertinent possible. Par exemple, l'objectif (du point de vue du concepteur) d'une association batterie-SCs est généralement d'augmenter la durée de vie de la batterie. La valeur efficace du courant de la batterie est utilisée dans certains travaux comme critère de performance à minimiser afin de répondre à cet objectif [Vinot 2010]. Il y a également la minimisation de la

quantité de charge consommée par la batterie [Santucci 2014]. Différents critères de performances peuvent être définis pour répondre à un même objectif (vu du concepteur).

*Résolution de problème* – une fois l'étape de formulation du problème de commande optimale achevée, il faut déterminer les valeurs de la variable de commande permettant de minimiser le critère de performance tout en respectant les contraintes imposées. Plus le nombre de sources est élevé et plus la résolution se complexifie. Par exemple, dans le cas de la programmation dynamique, il y a ce que Bellman a appelé la « malédiction de la dimension<sup>1</sup> » [Kirk 2004]. Cela traduit les besoins en stockage mémoire prohibitifs pour les problèmes à dimensions très élevés. Plus le nombre de sources augmente et plus la dimension du problème, donc la demande en stockage augmentent. La multiplication du nombre de sources est aussi problématique dans le cas des stratégies à base d'optimisation temps réel. Dans le cas du  $\lambda$ -control, il est nécessaire de déterminer l'élément clé de la stratégie, le multiplicateur de Lagrange hors ligne. Or, plus le nombre de sources augmente et plus le nombre de multiplicateurs de Lagrange augmente. Par conséquent, la synthèse de la stratégie se complexifie avec l'augmentation du nombre de sources.

#### I.3.4.4 Comparaison

Les deux approches (règles et optimisation) sont comparées autour des trois axes présentés précédemment (performances, applicabilité, synthèse) sur une échelle de 0 à 4 (Figure I-15). Les différents radars ont été déterminés en considérant des conditions de fonctionnement optimales (cycle de conduite connu a priori, sources non saturées). Aucune des approches ne satisfait tous les critères. Par ailleurs, l'approche qui pourrait représenter un bon compromis entre les différents critères est l'optimisation temps réel (Figure I-15.b). Cependant, la synthèse de ce type de stratégie reste une problématique essentielle. Les travaux de cette thèse sont relatifs à cet aspect. A noter que les radars peuvent évoluer. Par exemple, dans le cas de variation du cycle de conduite, les performances des stratégies à base d'optimisation peuvent être considérablement dégradées. De plus, certaines stratégies à base de règles peuvent s'avérer être très performantes.

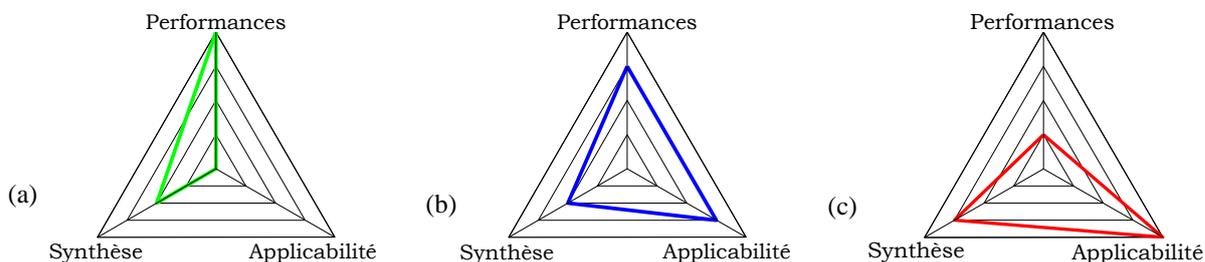


Figure I-15 : (a) optimisation hors ligne, (b) optimisation temps réel, (c) règles

<sup>1</sup> Anglais « the curse of Dimensionality »

## I.4 Méthode générique de gestion d'énergie

### I.4.1 Cadre des travaux

Cette thèse se déroule dans le cadre du réseau scientifique national MEGEVH (Modélisation Energétique et Gestion d'Énergie des Véhicules Hybrides) entre le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP) et le LTE-IFSTTAR à Bron. MEGEVH est un regroupement de laboratoires et d'industriels français qui travaillent en synergie. Au 1<sup>er</sup> janvier 2016, le réseau comprenait 10 partenaires académiques et 8 partenaires industriels (Figure I-16) [MEGEVH 2016]. Ce regroupement permet de mettre en commun les compétences de chacun, et de disposer de moyens afin de réaliser des essais expérimentaux (véhicules, plateformes d'essais). La thèse s'inscrit dans le cadre du projet MEGEVH multi-source, qui consiste à réaliser l'étude de véhicules à propulsion électrique, alimentés par plusieurs sources d'énergie, avec la prise en compte de leur durée de vie.



Figure I-16 : carte du réseau MEGEVH [MEGEVH 2016]

### I.4.2 Objectif et positionnement

#### I.4.2.1 Positionnement global et objectif de la thèse

De nombreux travaux ont été réalisés sur la gestion d'énergie de véhicules multi-sources. La problématique commune est la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie qui est loin d'être systématique. Cet aspect est d'autant plus important dans le cas des stratégies à base d'optimisation. En effet, pour un même système, plusieurs formulations du problème de commande optimale sont utilisées. Par ailleurs, plus le nombre de sources augmente et plus la formulation du problème de commande optimale devient complexe.

L'objectif de la thèse est de proposer une méthode structurée pour la synthèse de la gestion temps réel de l'énergie de véhicules multi-sources électriques ou hybrides. La thèse est principalement axée sur les stratégies à base d'optimisation temps réel. En effet, ces stratégies offrent le meilleur compromis entre performances et applicabilité.

### I.4.2.2 Démarche utilisée

Afin de structurer la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie, le formalisme REM est utilisé. La REM permet d'organiser le système et sa commande en trois niveaux bien distincts : le système, la commande « locale » et la commande « globale » (Figure I-9). Cet outil est utilisé afin d'aider à la formulation du problème de commande optimale. La synthèse de la stratégie est organisée en quatre étapes (Figure I-17):

- *Etape 1 - modélisation* : la modélisation du système est réalisée
- *Etape 2 - REM et structure de commande* : la REM du système est construite à partir du modèle du système. Cela permet de déduire la structure de commande (commande locale et lien avec la commande globale) du système.
- *Etape 3 - formulation du problème* : la formulation du problème de commande optimale est réalisée. L'approche REM permet de déduire les différentes possibilités de variables de commande. Par ailleurs, un modèle réduit du système est déduit par la réduction de la REM et de la structure de commande du système. C'est aspect est intéressant car la REM est normalement déduite de l'étape de modélisation du système. Ici, le modèle réduit est déduit de la REM (processus inverse).
- *Etape 4 - résolution du problème* : la résolution du problème de commande optimale est ensuite réalisée.

L'apport des travaux se situe essentiellement dans l'étape de formulation du problème de commande optimale (étape 3, Figure I-17) qui fait partie des problématiques majeures dans la synthèse de stratégies à base d'optimisation (cf. § I.3.4.3).

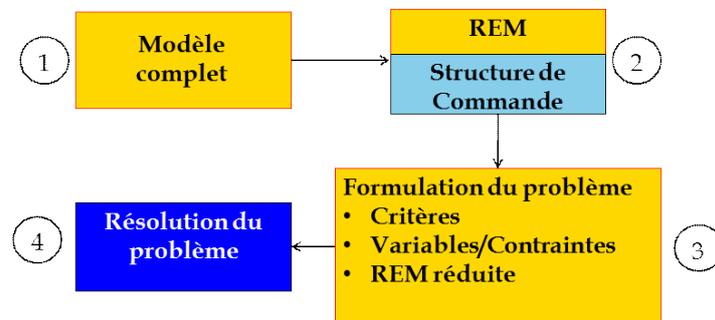


Figure I-17 : méthode utilisée pour la synthèse de la stratégie

### I.4.2.3 Positionnement par rapport aux Laboratoires

La REM a été développé par l'équipe commande du L2EP. Ce formalisme a pour vocation première la déduction de la structure de commande (commande locale) du système étudié. Un des axes prioritaires de l'équipe pour les cinq années à venir est de définir des règles afin d'organiser le niveau de commande global (stratégie). Les travaux réalisés par Ludovic Horrein (L2EP/PSA) [Horrein 2015b] ont contribué à cet aspect de structuration de la stratégie. En effet une décomposition de la stratégie en trois niveaux a été mise en place sur la base des travaux de Sajjad A. Syed (L2EP/Nexter) [Syed 2012]. Le niveau 1 correspond aux *fonctions* de la chaîne de transmission de puissance (propulsion/traction, freinage). Le niveau 2 correspond aux *modes de fonctionnement* du véhicule (propulsion/traction électrique, freinage mécanique...). Le niveau 3 correspond aux *flux de*

*puissances* qui sont les « chemins » pris pour assurer les modes de fonctionnement (propulsion électrique = batterie → machine électrique → transmission mécanique). Cela a permis de simplifier la résolution d'un problème de commande optimale par la programmation dynamique (optimisation hors ligne) dans le cas d'un VH parallèle. L'un des objectifs de cette thèse est de contribuer à la structuration de la stratégie mais sur un plan différent. En effet, dans la présente thèse, la structuration de la stratégie est déduite de la REM. Cela est fait d'une part par la déduction des possibilités de variables de commande (sorties de la stratégie) et d'autre part, par la déduction d'un modèle réduit du système par la réduction de la REM et de la structure de commande du système complet (étape 3, Figure I-17). Cela permet de faciliter la résolution du problème de commande optimale. De plus, les travaux sont orientés sur les stratégies à base d'optimisation temps réel. En ce qui concerne le LTE-IFSTTAR, plusieurs travaux ont été réalisés sur des stratégies de gestion d'énergie de véhicules multi-sources à base d'optimisation [Kermani 2009], [Naiff da Fonseca 2013]. Cependant, les travaux ont été orientés sur les méthodes de résolution et non sur la formulation du problème de commande optimale, sur laquelle est axée la présente thèse.

#### I.4.2.4 Positionnement par rapport au réseau MEGEVH

Cette thèse s'appuie sur des travaux précédents réalisés dans le cadre du réseau MEGEVH. Une stratégie à base d'optimisation temps réel a été développée par Saida Kermani (LAMIH/LTE-IFSTTAR) [Kermani 2009]. Les travaux étaient axés sur la méthode de résolution et ont été appliqués à un véhicule à deux sources (hybride batterie-MCI). La méthode de résolution utilisée dans cette thèse, est basée sur la méthode développée par Saida Kermani. Une méthode générique pour la modélisation et la déduction de la structure de commande de véhicules multi-sources a été développée dans les travaux d'Anne-Laure Allègre [Allègre 2010b]. Les travaux ont été essentiellement focalisés sur les VE batterie-SCs. Les REMs et les structures de commandes présentées dans ce mémoire sont basés sur les travaux d'Anne-Laure Allègre. Ludovic Horrein (L2EP/PSA) [Horrein 2015b] a proposé une méthode de structuration de la stratégie de gestion d'énergie d'un VH (basée sur les travaux de S.A. Syed [Syed 2012]). Cela a permis de réduire la dimension du problème de commande optimale. Les travaux présentés dans ce mémoire sont d'avantage axés sur la formulation du problème de commande optimale et sur les stratégies à base d'optimisation temps réel. De plus, l'objectif final est la gestion d'énergie de véhicules de plus de deux sources.

#### I.4.2.5 Synthèse des apports potentiels

L'aspect multi-source au sens large (plus de 2 sources) est un point essentiel de la présente thèse. D'un point de vue plus spécifique, la contribution à la structuration de la stratégie de gestion d'énergie de ce type de véhicules constitue un apport par rapport aux travaux existants. Enfin, la majorité des travaux sur les stratégies à base d'optimisation sont axés sur la formulation du problème de commande optimale. Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse visent à proposer une méthode structurée pour la formulation du problème de commande optimale.

## I.5 Conclusion du chapitre

Les véhicules électriques (VEs) représentent une solution répondant aux différents enjeux de la mobilité du futur. Cependant, ils doivent faire face aux différentes limitations liées aux batteries (autonomie, temps de charge, durée de vie). Les systèmes multi-sources sont un moyen pour répondre à cette problématique. Par exemple, dans le cas d'un véhicule batterie-supercondensateurs, les supercondensateurs peuvent diminuer les sollicitations des batteries et par conséquent favoriser la durée de vie de celles-ci.

Le véhicule hybride classique est un véhicule bi source. De nombreux travaux ont été réalisés sur la gestion d'énergie qui est un point complexe. En effet, un degré de liberté apparaît. Une bonne gestion d'énergie doit trouver la manière d'utiliser au mieux ce degré de liberté, afin d'assurer un comportement optimal des sources, dans différentes conditions de conduite. Les véhicules à plus de deux sources commencent à être étudiés, et leur gestion d'énergie s'avère être encore plus complexe. En effet, un degré de liberté apparaît, et la gestion d'énergie doit définir Les véhicules multi-sources représentent des systèmes particulièrement complexes. Les principales méthodes de gestion d'énergie utilisées dans le cas de véhicules multi-sources ont été présentées avec leurs avantages et les limitations qui sont associées.

Les méthodes de gestion d'énergie basées sur l'optimisation permettent de se rapprocher de l'utilisation optimale des degrés de liberté du système. Un des inconvénients majeurs des méthodes d'optimisation actuelles réside dans le fait que leur synthèse est basée en partie sur des méthodes heuristiques, notamment dans l'étape de formulation du problème de commande optimale.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode structurée pour la synthèse de la gestion d'énergie de véhicules multi-sources électriques ou hybrides, en particulier dans le cas de l'utilisation de stratégies à base d'optimisation. Cela passe entre autres, par la définition d'une méthode pour la réalisation de l'étape de formulation du problème de commande optimale. Le formalisme Représentation Energétique Macroscopique (REM) sera utilisé afin de structurer la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie.

# Chapitre II : Structuration de la gestion d'énergie pour véhicule à 2 sources

## Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode pour la réalisation de la gestion d'énergie d'un véhicule électrique à 2 sources. Une stratégie de gestion d'énergie est développée de manière structurée par l'intermédiaire de la Représentation Energétique Macroscopique (REM).

Une description des éléments constitutifs du véhicule à deux sources est donnée dans la première partie. La seconde partie est dédiée à la réalisation de la commande dite « locale » du système ; La troisième partie concerne la réalisation d'une stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation. Une extension des principes développés, à deux autres véhicules à 2 sources d'énergie, est proposée dans la dernière partie.

## Plan du chapitre

II.1	Cas du VE batterie/SCs avec un convertisseur.....	- 34 -
II.1.1	Architecture du système	- 34 -
II.1.2	Dimensionnement des éléments	- 36 -
II.2	Organisation de la commande du véhicule étudié .....	- 37 -
II.2.1	Modélisation et Représentation Energétique Macroscopique	- 37 -
II.2.2	Structure de commande par inversion	- 39 -
II.3	Stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation .....	- 41 -
II.3.1	Principe de la commande optimale	- 41 -
II.3.2	Formulation du problème d'optimisation à partir de la REM	- 43 -
II.3.3	Résolution du problème d'optimisation	- 48 -
II.3.4	Résultats de simulations	- 52 -
II.4	Extension à d'autres véhicules à 2 sources.....	- 55 -
II.4.1	Véhicule électrique batterie-SCs avec 2 convertisseurs	- 56 -
II.4.2	Véhicule à Pile à Combustible	- 62 -
II.5	Conclusion du chapitre.....	- 67 -

## II.1 Cas du VE batterie/SCs avec un convertisseur

L'architecture du véhicule est présentée en premier lieu. Des éléments concernant le choix des nouveaux constituants sont donnés par la suite.

### II.1.1 Architecture du système

Le véhicule étudié est une voiture électrique légère, la Tazzari Zero du L2EP (Figure II-1). La Tazzari est alimentée par une batterie Lithium-ion de type Lithium Fer Phosphate (LiFePO<sub>4</sub>). La batterie impose directement la tension du bus continu. Il n'y a donc pas de convertisseur DC-DC intermédiaire entre l'onduleur de la machine et la batterie. Une Machine Asynchrone (MAS) à cage d'écureuil sur l'axe arrière propulse le véhicule. Les principales caractéristiques du véhicule sont données Tableau II-2. De plus amples précisions sur le véhicule seront données dans le Chapitre IV pour les validations expérimentales. Dans le cadre de cette étude, un banc de SuperCondensateurs (SCs) est incorporé afin d'augmenter la durée de vie de la batterie. En effet, l'utilisation des SCs, sous réserve d'une gestion de l'énergie efficace, permet de diminuer les sollicitations imposées à la batterie [Lahyani 2013]. Or plusieurs études ont montré que la durée de vie des batteries est directement liée aux sollicitations qui lui sont imposées [Savoie 2012], [Devie 2012], [Omar 2014]. Comme mentionné dans le § I.2, il existe plusieurs types d'association batterie-SCs. L'association retenue est une association active avec un seul convertisseur. En effet, elle représente d'une part un bon compromis entre coût et performances. Elle permet d'autre part d'étudier l'impact des SCs sur un véhicule de série sans fortement modifier l'architecture d'origine. La batterie impose directement la tension du bus continu (topologie d'origine) et les SCs sont interfacés par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC (convertisseur DC-DC) (Figure II-2). Le système est décomposé en deux parties, le sous-système d'alimentation en énergie et le sous-système de propulsion.

#### II.1.1.1 Sous-Système d'alimentation en énergie

Le sous-système d'alimentation en énergie se compose de l'association entre les deux sources réversibles : la batterie et le banc de SCs avec son convertisseur DC-DC. Le cahier des charges des différentes sources est présenté Tableau II-1. Le véhicule ne peut pas effectuer de trajet complet sans la batterie qui est par conséquent, une source principale. Le banc de SCs est une source secondaire.

Tableau II-1 : cahier des charges des différentes sources

<b>Source</b>	<b>Cahier des charges</b>	<b>Priorité</b>
<b>Batterie</b>	Assurer l'autonomie du véhicule	Source principale
<b>SCs</b>	Augmenter la durée de vie de la batterie	Source secondaire

### II.1.1.2 Système de propulsion

Le système de propulsion est composé de la propulsion électrique (onduleur-machine électrique), de la transmission mécanique (réducteur – différentiel), des freins mécaniques, des roues et du châssis du véhicule. La route impose différents types d'efforts au véhicule. Il y a les efforts dus aux pentes, les efforts aérodynamiques ainsi que les efforts de frottements. L'objet de l'étude est le sous-système d'alimentation en énergie. L'ensemble constitué du système de propulsion et de l'environnement du véhicule (ainsi que la commande associée) est représenté comme une source de courant équivalente (Figure II-2). Cela a déjà été fait dans de précédents travaux sur les véhicules multi-sources [Allègre 2010b]. Le raisonnement par sources équivalentes a été présenté Chapitre I. Les détails concernant l'ensemble sous-système de propulsion sont donnés en Annexe B.



Figure II-1 : Le véhicule Tazzari Zero du L2EP

Tableau II-2 : Caractéristiques principales (batterie seule)

Elément	Caractéristiques
Véhicule	Vitesse maximale : 90 km/h Masse à vide (batterie comprise) : 542 kg   Charge utile <sup>1</sup> : 150 kg Volume maximal du coffre : 180 L   Nombre de passagers : 2
Batterie	80 V   24 cellules de 160 Ah, 24 x 5,6 kg
MAS	Puissance nominale : 15 kW

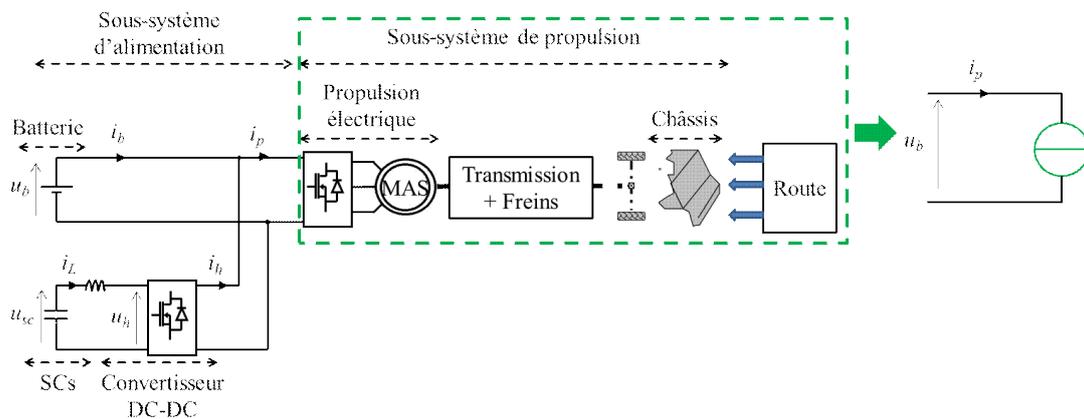


Figure II-2 : architecture du VE batterie/SCs

<sup>1</sup> Poids de chargement du véhicule. Le poids à vide du véhicule (sans charge additionnelle et sans le conducteur et les passagers), est soustrait du Poids Total Autorisé en Charge (P.T.A.C)

## II.1.2 Dimensionnement des éléments

### II.1.2.1 Bobine de lissage et convertisseur DC-DC

Le calcul de la valeur de l'inductance de la bobine de lissage est réalisé afin de limiter les ondulations  $\Delta i_L$  du courant de la bobine de lissage. L'inductance  $L$  doit répondre à la condition (II-1) [Bernot 2002]. Cette condition correspond au cas où la tension des SCs est nulle. Les valeurs considérées sont  $u_b = 80$  V,  $f_{sw} = 10$  kHz et  $\Delta i_{L-max} = 18,75$  A. L'inductance  $L$  doit être supérieure à 0,1 mH dans le cas étudié. A noter que la désignation des différentes variables est présentée en Nomenclature.

$$L \geq \frac{u_b}{4f_{sw}\Delta i_{L-max}} \quad (\text{II-1})$$

Le convertisseur DC-DC se compose des cellules de commutations et des éléments servant au refroidissement de composants. Plusieurs études ont été réalisées sur la conception de convertisseurs DC-DC pour des systèmes d'alimentation multi-sources pour véhicules électriques. Une puissance massique  $\rho_{conv}$  de 5 kW/kg pour l'ensemble convertisseur DC-DC et bobine de lissage est retenue après l'analyse de ces travaux [Louvrier 2010], [Boucherit 2011]. L'hypothèse est faite que la puissance maximale pouvant être appelée par le convertisseur DC-DC est la puissance maximale à l'entrée de l'onduleur. Cette puissance a été relevée sur des tests sur route du véhicule. En effet le véhicule du L2EP a été instrumenté pour avoir accès à différents signaux du véhicule (courant de la batterie, tension de la batterie...). La puissance maximale relevée à l'entrée de l'onduleur est de 22 kW. Une masse de 4,4 kg est retenue pour l'ensemble convertisseur DC-DC-bobine.

### II.1.2.2 Supercondensateurs

Plusieurs travaux ont été réalisés sur le dimensionnement des éléments de stockage des véhicules multi-sources [Akli 2008], [Jaafar 2009], [Jaafar 2011], [Sadoun 2013], [Ostadi 2015]. Le banc de SCs est dimensionné afin de répondre aux pics de puissances appelés par le système de propulsion. De plus, un critère énergétique par rapport au profil de puissance susceptible d'être imposé doit être pris en compte. Cependant, le dimensionnement doit répondre aussi à des critères liés à son implantation dans le véhicule. En effet, le banc de SCs ne doit pas excéder une certaine masse et un certain volume. L'intégralité de la procédure du dimensionnement du banc de SCs est présentée en Annexe C. Celle-ci se résume par l'organigramme de la Figure II-3. Le choix se porte vers 45 SCs de 58 F/15 V, répartis en 15 branches en parallèles composées chacune de 3 SCs en série. Par ailleurs la méthode utilisée ici est heuristique. Un dimensionnement plus précis aurait pu être réalisé notamment par l'intermédiaire de méthodes d'optimisations [Hung 2012], [Ostadi 2015] mais cela ne fait pas l'objet du travail présenté.

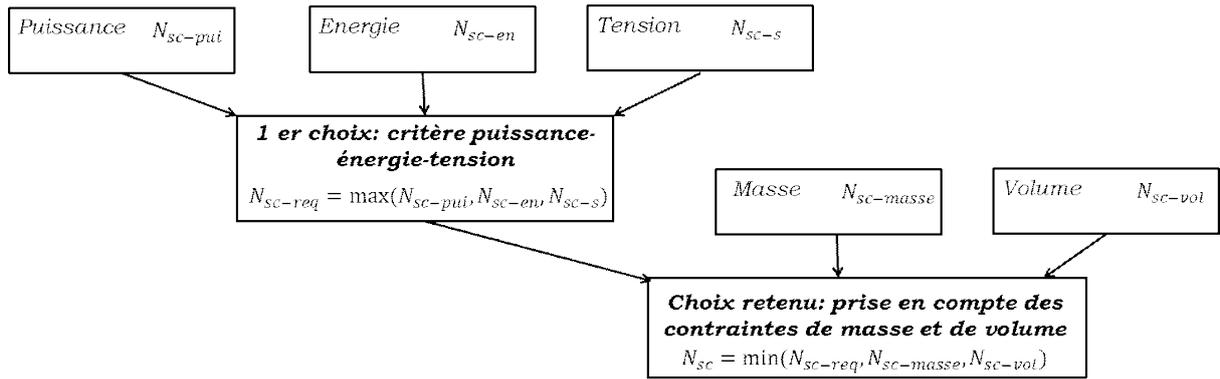


Figure II-3: Procédure de dimensionnement des SCs

## II.2 Organisation de la commande du véhicule étudié

Cette partie concerne la réalisation de la commande dite « locale » du système (cf. § I.3). La première partie traite de la modélisation et de la représentation du système par l'intermédiaire du formalisme graphique Représentation Énergétique Macroscopique (REM). La structure de commande du système est décrite par la suite.

### II.2.1 Modélisation et Représentation Énergétique Macroscopique

La Représentation Énergétique Macroscopique (REM) est une description graphique qui permet de mettre en évidence les propriétés énergétiques des constituants du système dans le but de développer sa structure de commande [Bouscayrol 2000], [Lhomme 2014]. La REM est une organisation des modèles des sous-systèmes afin de les interconnecter de façon fonctionnelle et causale. Une première étape de modélisation est par conséquent nécessaire.

#### II.2.1.1 Modélisation de la batterie

Le modèle de la batterie doit permettre de prendre en compte les principales chutes de tensions associées. Selon des études réalisées sur des batteries de type  $LiFePO_4$ , il s'avère que les deux phénomènes prépondérants sont les surtensions *ohmiques* ainsi que les surtensions dites de *diffusion* [Hellwig 2011]. Le modèle retenu prend en compte ces deux phénomènes (Figure II-4.a) avec *OCV* (*Open Circuit Voltage*) la tension à vide de la batterie,  $r_b$  la résistance série (surtensions ohmiques) de la batterie. L'impédance du CPE (Constant Phase Element, surtensions de diffusion) est définie par la relation (II-2). Le réel  $k$  est compris entre 0 et 1 et le terme  $Q$  est constant. Ce modèle a été caractérisé expérimentalement au LTE-IFSTTAR et validé avec une erreur inférieure à 4 % sur la réponse en tension (cf. Annexe D).

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q(j\omega)^k} \quad k \in [0,1] \quad (II-2)$$

### II.2.1.2 Modélisation des SCs

De nombreux travaux ont été réalisés sur la modélisation des supercondensateurs [Belhachemi 2001], [Rizoug 2006]. Le banc de SCs est modélisé par l'intermédiaire d'un modèle de Zubieta et Bonert à deux branches R-C [Zubieta 2000] (Figure II-4.b) avec  $r_{sc}$  la résistance série du banc,  $C_{sc}$  la capacité principale et  $C_{il}$  le coefficient d'évolution de la capacité variable avec la tension aux bornes des condensateurs du modèle. Ce modèle permet de prendre en compte les dynamiques rapides des SCs. Cela correspond au profil de courant qui leurs est imposé.

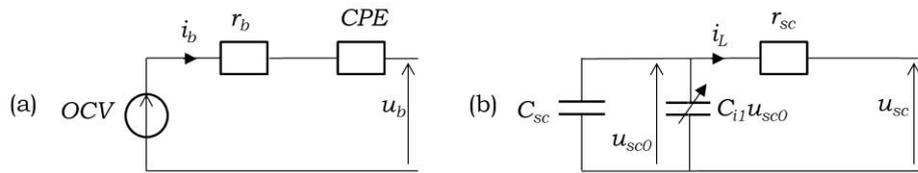


Figure II-4 : (a) modèle de la batterie, (b) modèle des SCs

### II.2.1.3 Modélisation de la bobine de lissage

La bobine de lissage est modélisée par un circuit  $R-L$  série en considérant qu'il n'y a pas de saturation du circuit magnétique (avec  $r_L$  et  $L$  respectivement l'inductance et la résistance série de la bobine de lissage).

$$L \frac{d}{dt} i_L = u_{sc} - u_h - r_L i_L \quad (\text{II-3})$$

### II.2.1.4 Modélisation du convertisseur DC-DC

En considérant le temps de réponse du courant  $i_L$  beaucoup plus grand que la période de commutation des interrupteurs du convertisseur DC-DC, un modèle aux valeurs moyennes est utilisé [Hautier 1999], [Delarue 2003]. Le modèle est exprimé par la relation (II-4) avec  $\eta$  le rendement du convertisseur et  $m$  la fonction de modulation du convertisseur (entre 0 et 1).

$$\begin{cases} u_h = m u_b \\ i_h = m \eta^\gamma i_L \end{cases} \quad m \in [0; 1], \begin{cases} \gamma = -1, u_b i_L < 0 \\ \gamma = 1, u_b i_L \geq 0 \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

### II.2.1.5 Connexion en parallèle

La connexion en parallèle entre la batterie, la branche des SCs et le système de propulsion est exprimé par l'intermédiaire des lois de Kirchhoff.

$$\begin{cases} i_p = i_b + i_h \\ u_b \text{ commun} \end{cases} \quad (\text{II-5})$$

### II.2.1.6 Représentation Energétique Macroscopique du système

La REM du système est présentée Figure III-6. L'objet de l'étude étant le sous-système d'alimentation en énergie, le sous-système de propulsion est représenté par une source de courant. Par conséquent, la REM du système est constituée de trois sources, la batterie (source de tension), le banc de SCs (source de tension) et le sous-système de propulsion (source de courant).

### II.2.2 Structure de commande par inversion

L'approche de la REM consiste à organiser la commande du système en deux niveaux. La commande dite « locale » permet de commander chaque élément du système de façon systémique (i.e. en prenant en compte les interactions entre chaque élément). La commande globale coordonne les sous-systèmes afin d'atteindre un objectif global. La structure de commande correspond à la commande dite « locale » du système. Elle permet entre autres, de définir le nombre de correcteurs nécessaire ainsi que le nombre de mesures à effectuer. La structure de commande est réalisée en définissant dans un premier temps les chaînes de réglages du système. Les chaînes de réglage relient les variables de réglages aux variables objectifs (i.e. à contrôler). La structure de commande est déduite par inversion des éléments de la REM traversés par les chaînes de réglage.

L'objectif de la commande du sous-système d'alimentation en énergie est de répartir les flux d'énergie entre la batterie et le banc de SCs. En analysant la REM du système, cette répartition se fait au niveau du couplage électrique (Figure III-6). Le courant de la propulsion  $i_p$  étant imposé, cette répartition peut se faire directement soit par le contrôle du courant du convertisseur  $i_n$ , soit par le contrôle du courant de la batterie  $i_b$ . Par ailleurs, cette répartition peut aussi être assurée de manière indirecte par le contrôle du courant de la bobine  $i_L$  (image du courant  $i_n$ ) dans d'autres travaux [Ortuzar 2007], [Tani 2012]. La structure de commande de ce système a été étudiée lors de précédents travaux [Allègre 2010b]. La durée de vie de la batterie est liée au courant qui lui est imposé. Dès lors, le choix se porte vers le contrôle du courant  $i_b$  qui permet de maîtriser plus directement la durée de vie de la batterie. La structure de commande du sous-système d'alimentation consiste donc à définir les valeurs appropriées de la variable de réglage, la fonction de modulation  $m$  du convertisseur afin de contrôler correctement le courant  $i_b$ . La chaîne de réglage correspondante est donnée Figure II-5. La structure de commande du sous-système d'alimentation en est déduite par inversion des éléments se trouvant sur la chaîne de réglage (Figure II-6).

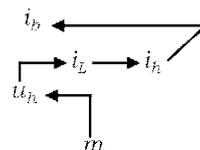


Figure II-5 : chaîne de réglage du sous-système d'alimentation

Le courant de référence du convertisseur DC-DC  $i_{n-ref}$  est défini en inversant la relation (II-5) correspond au couplage. Cela est exprimé par (II-6).

$$i_{h-ref} = i_{p-mes} - i_{b-ref} \quad (II-6)$$

Il est nécessaire de contrôler les grandeurs imposées par les éléments d'accumulation d'énergie pour éviter des problèmes d'instabilités [Lhomme 2007]. Le courant de référence de la bobine  $i_{L-ref}$  est défini à partir du courant de référence du convertisseur  $i_{h-ref}$  et du rapport de modulation  $m$ . Cela correspond à la relation (II-7).

$$i_{L-ref} = \frac{i_{h-ref}}{m} \quad (II-7)$$

L'inversion de l'élément d'accumulation représentant le modèle de la bobine de lissage se fait par l'intermédiaire d'un correcteur. La tension de référence  $u_{h-ref}$  de sortie du convertisseur DC-DC est défini par la relation (II-8). C'est une inversion indirecte de la relation (II-3). La valeur de la fonction de modulation  $m$  est définie par (II-9).

$$u_{h-ref} = -Cor_L [i_{L-ref} - i_L] + u_{sc-mes} \quad (II-8)$$

$$m = \frac{u_{h-ref}}{u_{b-mes}} \quad \text{avec } m \in [0,1] \quad (II-9)$$

A noter que (II-7) et (II-9) créent une relation du type  $m=f(m)$ . Cela peut causer des problèmes de boucles algébriques. Cependant des solutions efficaces sont utilisées afin de palier à ce type de problème [Castaings 2014], [Castaings 2015a].

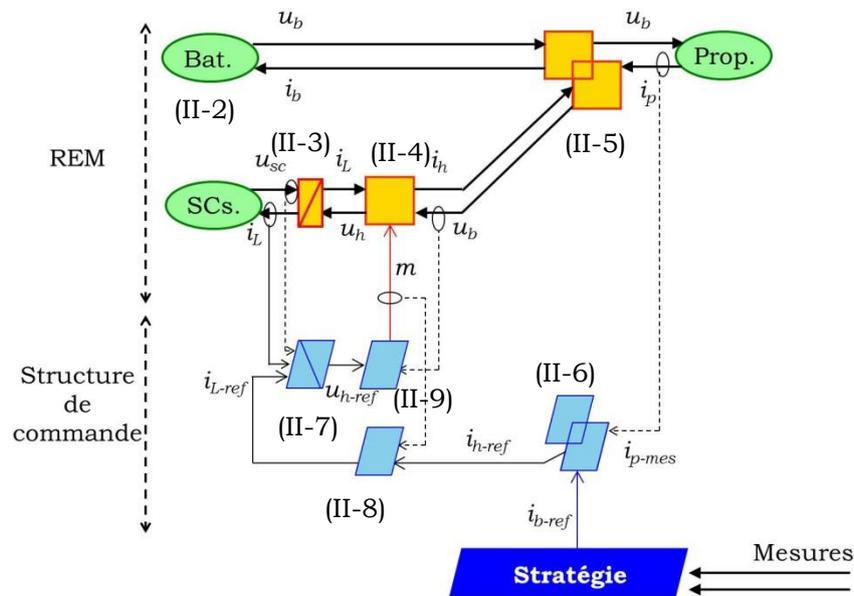


Figure II-6 : REM et structure de commande du système

## II.3 Stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation

La stratégie de gestion d'énergie vise à utiliser au mieux les sources de stockage d'énergie qui composent le Sous-système d'alimentation (cf. § I.3). Il existe deux grandes familles de stratégies de gestion d'énergie, celles à base de règles ainsi que celles à base d'optimisation. La stratégie de gestion d'énergie développée ici est à base d'optimisation. Le développement de ce type de stratégie se déroule en deux étapes : la formulation du problème de commande optimale puis sa résolution. La première partie vise à présenter le principe de la commande optimale de manière synthétique. La seconde partie traite de l'étape de formulation du problème d'optimisation. La troisième partie est dédiée à l'étape de résolution du problème de commande optimale. Des résultats de simulation sont donnés à la fin du chapitre.

### II.3.1 Principe de la commande optimale

#### II.3.1.1 Principe général

Soit le système défini par la relation (II-10) dont les paramètres sont indépendants du temps. Le principe de la commande optimale consiste à faire évoluer ce système en lui imposant une variable de commande  $u$  de façon à minimiser un critère de performances  $J$  (II-11) (Figure II-7). Ce type de problème de commande optimale est appelé *problème de Lagrange* [Becerra 2011]. Il faut par conséquent définir les paramètres de la commande optimale ainsi que les variables associées (i.e.  $u$  et  $x$ ). Par ailleurs, il existe deux types de commande optimale (au sens structurel). Le premier type, la commande optimale en Boucle Ouverte (BO, Figure II-8.a), consiste à ce que la commande optimale ne tienne compte que de la valeur d'origine  $x_0$  de la variable d'état  $x$  (pas de boucle fermée pour  $x$ ). Ce type de commande optimale ne permet donc pas de prendre en compte les limitations de la variable d'état  $x$  (i.e. bornes maximales et minimales) dans tous les cas (écarts de modèles, cycles non connus). Ce type de commande optimale est donc essentiellement dédié aux applications hors ligne. Le second type est la commande optimale en Boucle Fermée (BF, Figure II-8.b) qui permet de prendre en compte les limitations sur la variable d'état  $x$  (boucle fermée pour  $x$ ). La commande optimale en BF est par conséquent plus appropriée aux applications en temps réel. La stratégie du  $\lambda$ -control évoqué dans le chapitre précédent (cf. § I.3.3) est basée sur le principe de la commande optimale en BF. A noter qu'il y a des grandeurs qui agissent sur le système de manière externe et qui ne sont pas contrôlables par la stratégie, elles sont appelées *variables exogènes*. La commande optimale peut prendre en compte les *variables exogènes* par l'intermédiaire de mesures (cf. Figure II-8).

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t)) \quad (\text{II-10})$$

$$J(u) = \int_{(T)} L(x(t), u(t)) dt \quad (\text{II-11})$$

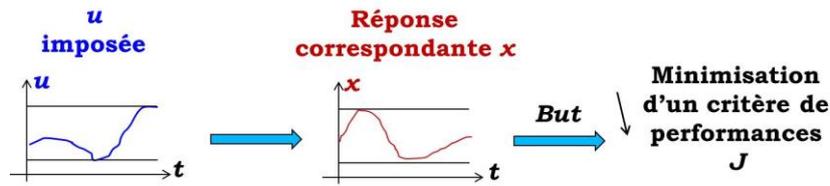


Figure II-7: principe de la commande optimale

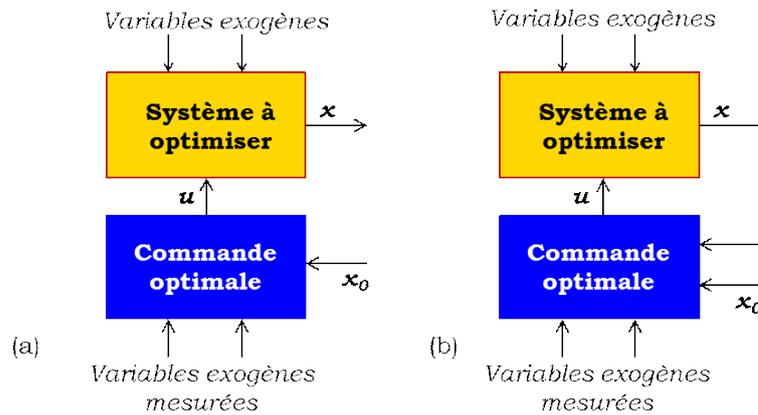


Figure II-8: (a) commande optimale en BO, (b) commande optimale en BF (inspirée de [Kirk 2004])

### II.3.1.2 Application aux véhicules multi-sources

La REM permet de faire naturellement la différence entre la commande locale et la stratégie. Dans le cas d'un véhicule multi-source, la REM nous indique que la commande optimale correspond à la stratégie de gestion d'énergie. Par déduction, la variable de commande  $u$  est celle imposée par la stratégie. Dans le véhicule étudié, le courant  $i_{b-ref}$  apparaît directement comme étant la variable de commande (Figure II-6).

Par ailleurs, le système à optimiser correspond au sous-système d'alimentation en énergie associé à sa structure de commande. Les sorties de l'ensemble correspondent aux variables d'états  $x$ . Les variables d'états  $x$  sont une image de l'énergie mise en jeu dans les sources contraintes par la stratégie (état énergétique imposé). Ce sont les sources de priorité secondaire. En résumé, la stratégie de gestion d'énergie agit sur l'ensemble du système d'alimentation (via sa structure de commande) tout en commandant énergétiquement certaines sources (sources secondaires) par l'intermédiaire des variables d'états  $x$  associées. Ceci est fait dans le but de minimiser des critères de performances  $J$ . L'objectif de ce travail est de proposer une stratégie de gestion d'énergie applicable en temps réel. Par conséquent, une structure de commande optimale en BF est choisie. Par analogie avec la REM, la structure correspondante est donnée Figure II-9 (le détail du choix des différentes variables est donné dans la partie suivante § II.3.2). Il y a deux étapes dans la réalisation de la stratégie de gestion d'énergie, la *formulation* et la *résolution* du problème d'optimisation.

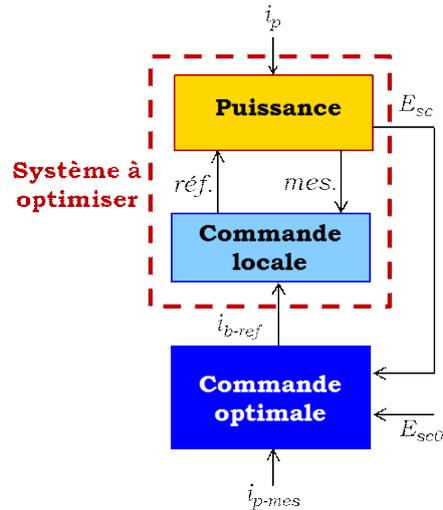


Figure II-9: structure de commande optimale adoptée

### II.3.2 Formulation du problème d'optimisation à partir de la REM

La première étape à réaliser lors de la réalisation d'une stratégie à base d'optimisation est la formulation du problème de commande optimale. Cela se traduit dans la littérature en trois parties ; la détermination des variables du problème de commande optimale et des contraintes associées, la détermination des critères de performances et la description mathématique du problème de commande optimale [Guzzella 2013a], [Kirk 2004]. Dans le cadre de cette étude, un ordre a été établi entre les différentes étapes d'une part. D'autre part, une étape supplémentaire a été ajoutée : la réalisation de la REM et de la structure de commande du système.

0. *Définition de la REM du système et déduction de la structure de commande associée* : cette étape a été détaillée dans le § précédent.
1. *Définition des critères de performances* : cette étape consiste à définir les critères de performances à minimiser par la stratégie de gestion d'énergie. Cela correspond à l'objectif devant être atteint par la stratégie. Un critère de performance correspond à une grandeur que le concepteur va définir afin d'évaluer la performance d'un système.
2. *Définitions des variables du problème et des contraintes associées* : cette étape consiste à définir dans un premier temps, les variables de commandes  $u$  à imposer au système. Dans un second temps, elle consiste à définir les variables d'états  $x$  à contraindre par la stratégie. Par ailleurs, il est nécessaire d'identifier les variables *exogènes*. Ce sont les grandeurs physiques imposées de manière externe au système.
3. *Description mathématique du problème de commande optimale* : cette étape consiste à déterminer le modèle du système à contrôler. Cela correspond à définir les relations traduisant l'évolution des variables d'état  $x$  en fonction notamment des variables de commandes  $u$ . Le critère de performance est aussi défini en fonction des variables de commandes  $u$ .

Plusieurs formulations peuvent être trouvées pour le même système et le même objectif. L'idée ici est de formuler le problème de manière structurée par l'intermédiaire de la REM. Par la suite ces différentes étapes seront détaillées sur l'application correspondant au VE batterie-SCs étudié.

### II.3.2.1 Choix du critère de performances

L'objectif de l'association batterie-SCs étudiée est d'augmenter la durée de vie de la batterie. La stratégie de gestion d'énergie vise à imposer une des variables de commande au système afin d'assurer cet objectif. Le critère de performance à minimiser est équivalent au vieillissement de la batterie Li-ion. Il est donc nécessaire de déterminer une grandeur physique traduisant ce vieillissement.

Plusieurs études ont mis en évidence les paramètres influençant la durée de vie des batteries Li-ion. Les principaux paramètres qui ont été retenus sont la température [Liu 2010], la profondeur de décharge<sup>1</sup> [Peterson 2010], le protocole de charge [Choi 2002] et le niveau du courant imposé [Omar 2014]. Une synthèse des études réalisées sur ce sujet est donnée dans [Devie 2012]. La valeur efficace du courant de la batterie s'avère être particulièrement représentative des paramètres influençant le vieillissement de la batterie. En effet, minimiser la valeur efficace du courant de la batterie permet de limiter l'augmentation de la température de celle-ci. De plus, cela permet aussi, entre autres, de limiter les niveaux de courants imposés à la batterie. Le choix du critère de performances  $J$  se porte donc vers la valeur efficace du courant de la batterie qui s'exprime par (II-12) avec  $T_{cycle}$  l'horizon du cycle de conduite considéré (i.e. fenêtre considérée).

$$J = \sqrt{\frac{1}{T_{cycle}} \int_{t_0}^{t_f} i_b^2 dt} \quad \text{avec} \quad T_{cycle} = t_f - t_0 \quad (\text{II-12})$$

Cela revient à minimiser le critère  $J'$  exprimé par :

$$J' = \int_{t_0}^{t_f} i_b^2 dt \quad (\text{II-13})$$

### II.3.2.2 Définition des variables du problème et des contraintes associées

Cette étape consiste à déterminer les grandeurs sur lesquelles va agir la stratégie de gestion d'énergie afin d'atteindre les objectifs fixés. Cela consiste d'une part à définir la variable de commande  $u$  qui sera imposée par la stratégie et d'autre part, à définir la variable d'état  $x$  dont l'évolution sera contrainte par la stratégie. Le choix de la variable de commande  $u$  à imposer s'effectue à partir de la REM et de la structure de commande du système (Figure II-6). La variable de commande à imposer est la grandeur provenant du bloc de la stratégie du sous-système d'alimentation en énergie. Par conséquent, le choix s'avère

<sup>1</sup> Anglais DoD (Depth of Discharge)

être la référence du courant de la batterie  $i_{b-ref}$ . Par ailleurs, il est nécessaire d'imposer des *limitations* (contraintes de type inégalités) à  $i_{b-ref}$ . Celles-ci permettent de prendre en compte le courant maximal admissible en décharge<sup>1</sup>  $i_{b-M}$  de la batterie, ainsi que le courant minimal admissible en charge de la batterie  $i_{b-m}$ . Ces limitations sont exprimées par la relation (II-14).

$$i_{b-m} \leq i_{b-ref} \leq i_{b-M} \quad (II-14)$$

Afin d'effectuer le choix de la variable d'état appropriée  $x$  il est nécessaire d'analyser le système. La variable d'état  $x$  est relative à l'énergie de la source considérée (cf. § II.3.1.2). Dès lors, contraindre  $x$  est équivalent à commander l'évolution de l'énergie de la source liée. Le sous-système d'alimentation est constitué de deux sources de stockage d'énergie, une principale (la batterie) et l'autre secondaire (les SCs, cf. Tableau II-2). La batterie étant la source principale de stockage d'énergie elle ne peut pas être contrainte énergétiquement par la stratégie. Comme dans le véhicule avec une batterie seule, si la batterie atteint un niveau de SoC trop bas le véhicule doit s'arrêter (i.e. réservoir énergétique vide). La variable  $x$  pouvant être contrainte par la stratégie est donc l'énergie  $E_{sc}$  aux bornes du banc de SCs. Cela revient à contraindre la tension  $u_{sc}$  aux bornes des SCs. Deux types de contraintes sont imposés à cette variable. La première contrainte est de type inégalité et consiste à imposer des bornes maximales  $u_M$  et minimales  $u_m$  à la tension des SCs (II-15). A noter que la tension des SCs  $u_{sc}$  est l'image directement mesurable de la variable d'état  $E_{sc}$  (sortie du système). La variable d'état  $E_{sc}$  sera donc contrainte par l'intermédiaire de la tension  $u_{sc}$ .

$$u_{sc-m} \leq u_{sc}(t) \leq u_{sc-M} \quad (II-15)$$

La seconde contrainte est dite de « charge sustaining ». Elle consiste à imposer un bilan énergétique nul des SCs entre le début et la fin de l'horizon du cycle considéré. Cette contrainte se traduit par la relation (II-16) avec  $t_0$  et  $t_f$  respectivement l'instant initial et l'instant final de l'horizon du cycle considéré.

$$u_{sc}(t_f) = u_{sc}(t_0) \quad (II-16)$$

Contrairement à la contrainte de « charge sustaining » (II-16), la première contrainte (II-15) n'est pas imposée de manière volontaire. En effet, cette contrainte est due aux limitations du système. Pour plus de clarté, les contraintes volontaires (II-16) seront appelées *contraintes* tandis que celles liées aux limitations du système (II-15) seront appelées *limitations* dans la suite du manuscrit. Il est également nécessaire d'identifier les différentes variables exogènes. Ces variables sont définies comme les grandeurs imposées de manière externe au sous-système considéré. La stratégie de gestion d'énergie peut être alors exprimée en fonction de ces grandeurs. L'élément de couplage (doubles carrés orange) met en évidence l'association entre la batterie et les SCs (cf. Figure II-6). Il apparaît que le

---

<sup>1</sup> Batterie en convention générateur. En décharge  $i_{b} \geq 0$

courant du sous-système de propulsion  $i_p$  est la variable imposée de manière externe à l'association des sources. C'est donc la variable *exogène*. Une synthèse du choix des variables du problème de commande optimale est donnée Tableau II-3.

Tableau II-3 : synthèse des variables du problème choisies pour le VE batterie-SCs

Type de variable	Choix	Contrainte(s)	Limitation(s) (contraintes inégalités)
<b>Variable d'état <math>x</math></b>	Energie des SCs, $E_{sc}$ (déduite d'une analyse)	$u_{sc}(t_f) = u_{sc}(t_0)$	$u_m \leq u_{sc}(t) \leq u_M$
<b>Variable de commande <math>u</math></b>	Courant de référence de la batterie $i_{b-ref}$ (déduite par la REM)		$i_{b-m} \leq i_{b-ref} \leq i_{b-M}$
<b>Variables exogènes</b>	Courant du sous-système de propulsion, $i_p$ (déduite par la REM)		

La problématique principale des approches classiques pour la formulation des problèmes de commande optimale est que pour le même système et le même objectif, plusieurs choix de variables d'états  $x$  et de variables de commande  $u$  peuvent être recensés. Par exemple, la puissance aux bornes des SCs et l'énergie aux bornes de la capacité parfaite dans le modèle des SCs ont été choisies respectivement comme variable de commande et variable d'état dans [Vinot 2010] pour le même système batterie-SCs que celui étudié dans ce travail. De même le ratio de puissance entre la batterie et les SCs a été utilisé comme variable de commande dans [Hung 2012] pour le même type de système batterie-SCs. La REM permettant une claire distinction entre la structure de commande et la stratégie, le courant  $i_{b-ref}$  a été défini comme variable de commande.

### II.3.2.3 Description mathématique du problème

Afin de pouvoir résoudre le problème de commande optimale, il est nécessaire de définir une description mathématique du problème. Cette étape est nécessaire car la méthode de résolution utilisée est une méthode « exacte » qui est basée sur le modèle du système. La description mathématique du problème consiste d'abord à définir un modèle réduit du système considéré. Cela permet de faciliter la résolution du problème. Classiquement, des modèles statiques ou quasi-statiques sont utilisés [Guzzella 2013a]. Les dynamiques les plus rapides ne sont pas considérées. La priorité est de conserver les principales propriétés énergétiques du système (i.e. interactions entre les éléments, principales pertes associées). Ces types de modèles peuvent être utilisés lorsque les phénomènes transitoires ont une importance négligeable par rapport au régime permanent.

Dans cette étude, le modèle réduit est déduit par simplification de l'ensemble REM et structure de commande du sous-système d'alimentation [Castaings 2015b], [Castaings 2016]. En effet, la REM étant basée sur le principe d'action-réaction entre les différents éléments, cela permet de respecter les interactions entre les différents sous-systèmes. Différentes applications de réductions de modèles à partir de la REM ont été présentées [Letrouvé 2010], [Horrein 2011], [Mayet 2014a]. Le modèle correspondant s'exprime par (II-17) avec  $\eta_g$  le rendement global de l'ensemble constitué par la bobine de lissage, le

convertisseur DC-DC et la structure de commande associée (Figure II-11.b). L'hypothèse faite sur la commande est exprimée par (II-18). Cette hypothèse reste valable en considérant que la commande locale du système est bien réalisée et que le temps de réponse entre la mesure et la référence du courant  $i_h$  est très inférieur aux dynamiques de sa référence  $i_{h-ref}$ . Par ailleurs, le modèle de la batterie est aussi simplifié pour la définition de la stratégie. Un modèle simple incluant une tension à vide<sup>1</sup> et une résistance en série (II-20) est utilisée (Figure II-10). A noter que l'élément de couplage doit être conservé car il traduit l'action de la stratégie (i.e. répartition des flux d'énergie). Plus de détails sont donnés en Annexe E.

$$u_{sc}i_L = u_b i_h \eta_g \gamma_g \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \gamma_g = -1, i_L > 0 \\ \gamma_g = 1, i_L \leq 0 \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

$$i_h = i_{h-ref} \quad (\text{II-18})$$

Avec l'hypothèse (II-18), et en effectuant la compensation du courant  $i_p$  (Figure II-11.b) cela revient à (II-19). Cela est dû à la relation traduisant le couplage (II-5) et à celle traduisant son inversion (II-6).

$$i_{b-ref} = i_b \quad (\text{II-19})$$

$$u_b = OCV - r_b i_b \quad (\text{II-20})$$

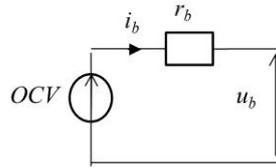


Figure II-10: modèle simplifié de la batterie

La seconde étape de la description mathématique du problème consiste à exprimer le critère de performances en fonction de la variable de commande identifiée lors de la définition des variables du problème de commande optimale (Tableau II-3). Le critère de performance  $J'$  doit être exprimé en fonction de  $i_{b-ref}$  (II-21).

$$J' = \int_{t_0}^{t_f} i_{b-ref}^2 dt \quad (\text{II-21})$$

<sup>1</sup> Anglais OCV (Open Circuit Voltage)

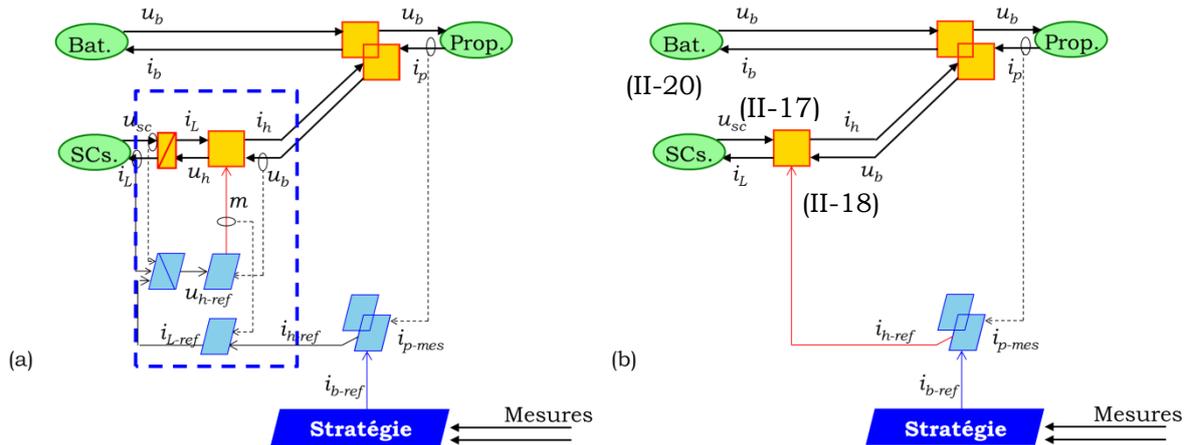


Figure II-11 (a) REM et structure de commande du modèle dynamique, (b) REM et structure de commande du modèle réduit (modèle d'optimisation)

La formulation du problème étant réalisée, l'étape de résolution du problème de commande optimale est présentée dans la partie suivante.

### II.3.3 Résolution du problème d'optimisation

#### II.3.3.1 Choix de la méthode de résolution

La résolution du problème de commande optimale consiste à définir l'ensemble des valeurs appropriées de la variable de commande permettant de minimiser le critère de performances. C'est l'étape de définition des paramètres de la stratégie de gestion d'énergie. De plus ces valeurs de la variable de commande doivent permettre de respecter les différentes contraintes imposées. En d'autres termes, la stratégie de gestion d'énergie impose au système le résultat de la résolution du problème de commande optimale. Il existe différentes types de méthodes de résolution (cf. § I.3).

Afin de définir un cahier des charges pour la méthode de résolution du problème de commande optimale il est nécessaire de déterminer les contraintes associées à la stratégie de gestion d'énergie. L'objectif de la méthode développée dans le cadre de ce travail est de définir une stratégie de gestion d'énergie applicable en temps réel. Une stratégie de gestion d'énergie applicable en temps réel doit répondre à trois types de critères qui ont été classés par ordre de priorités dans cette thèse :

- 1 - *Applicabilité* : afin d'être applicable en temps réel, le temps de calcul relatif à la stratégie de gestion d'énergie ne doit pas être prohibitif. En effet il est nécessaire de pouvoir calculer la variable de commande  $i_{b-ref}$  adéquate avant que le système ait évolué de manière significative. Cela est directement lié à la variable imposée  $i_p$ . En d'autres termes le temps de calcul relatif à la stratégie doit être inférieur aux dynamiques des phases d'accélération (ou décélération) du véhicule.
- 2 - *Sécurité* : la stratégie de gestion d'énergie du Sous-système d'alimentation doit solliciter les sources d'énergie en respectant leurs limitations physiques et ce pour toute mission possible du véhicule. En effet certaines limitations (tension maximale des SCs) sont relatives à la sécurité du système.

3 - *Performance* : la stratégie de gestion d'énergie doit permettre de se situer le plus proche possible des objectifs fixés. Dans l'exemple du VE batterie-SCs étudié cela signifie que la stratégie doit permettre de minimiser le mieux possible la valeur efficace du courant de la batterie (cf. critère de performance). Par ailleurs, les performances seront, entre autres, liées aux deux critères précédents. En effet, plus le calcul pourra s'effectuer rapidement et plus la stratégie pourra s'adapter aux évolutions du système. De plus, les limitations de la tension des SCs expriment des saturations du système. Dès lors, quand ces limitations seront atteintes, les performances seront réduites.

La méthode de résolution utilisée est une méthode analytique basée sur le calcul des variations, le  $\lambda$ -control [Kessels 2008]. L'application de la méthode est détaillée par la suite.

### II.3.3.2 Résolution générale du problème de commande optimale

Le  $\lambda$ -control est basé sur le principe du *Minimum de Pontriaguine* [Delprat 2002a], [Kessels 2008], [Nguyen 2014]. La méthode consiste à déterminer la trajectoire de la variable de commande  $u$  qui permettra de minimiser une fonction  $H$  appelée Hamiltonien à chaque instant de l'horizon du cycle de conduite considéré. En reprenant les relations (II-10) et (II-11), le Hamiltonien se définit par (II-22) avec  $\lambda$  appelé multiplicateur de Lagrange.

$$H(x(t), u(t), \lambda(t)) = L(x(t), u(t)) + \lambda(t) \frac{d}{dt}x(t) \quad (\text{II-22})$$

Afin de déterminer la trajectoire de la variable de commande  $u$  minimisant le Hamiltonien les conditions nécessaires d'optimalité sont définies par (avec  $H$  dérivable) :

$$\frac{d}{dt}x(t) = \frac{\partial H(x(t), u(t), \lambda(t))}{\partial \lambda} \quad (\text{II-23})$$

$$\frac{d}{dt}\lambda(t) = -\frac{\partial H(x(t), u(t), \lambda(t))}{\partial x} \quad (\text{II-24})$$

$$H(x(t), u^*(t), \lambda(t)) \leq H(x(t), u(t), \lambda(t)) \quad (\text{II-25})$$

La condition (II-25) doit être respectée à chaque instant et ce pour toute valeur possible de  $u$ . Le terme en \* correspond à la trajectoire minimisant le Hamiltonien. Le Hamiltonien possède un extremum unique situé sur l'intervalle de définition de la variable de commande  $u$ , si la condition (II-25) devient (II-26). Par conséquent, l'expression analytique de  $u$  peut être déterminée par cette dernière relation. C'est le principe du *Calcul des Variations* appliqué à la commande optimale.

$$\frac{\partial H}{\partial u_{ref}^*} = 0 \quad (\text{II-26})$$

De plus, une condition suffisante d'optimalité (II-27) est définie afin de garantir que l'extremum défini correspond bien à un minimum du Hamiltonien.

$$\frac{\partial^2 H}{\partial u_{ref}^{*2}} \geq 0 \quad (\text{II-27})$$

Appliquons ce principe au modèle d'optimisation représenté par la REM et la structure de commande (Figure II-11 b) à partir du choix adopté pour les variables du problème de commande optimale (Tableau II-3) et du critère de performances défini par (II-13).

$$H(E_{sc}(t), i_{b-ref}(t), \lambda(t)) = i_{b-ref}^2(t) + \lambda(t) \frac{d}{dt} E_{sc} \quad (\text{II-28})$$

Avec les SCs en convention générateur :

$$\frac{d}{dt} E_{sc} = -P_{sc}(t) = u_{sc} i_L \quad (\text{II-29})$$

En appliquant les conditions nécessaires d'optimalité (II-23), (II-24), (II-26) et à partir des différents éléments du modèle d'optimisation, l'expression de la trajectoire de  $i_{b-ref}$  correspondant à l'extremum du Hamiltonien est exprimée par (II-30). Le détail des calculs est présenté en Annexe F. A noter que cela correspond à une commande optimale en BO.

$$i_{b-ref}^*(t) = \frac{\lambda \eta_g^{\gamma_g} (OCV + r_b i_p)}{2(\lambda r_b \eta_g^{\gamma_g} - 1)} \quad (\text{II-30})$$

A noter que la résolution des conditions nécessaires d'optimalité impose le paramètre  $\lambda$  constant. Cela est dû à l'hypothèse que le rendement global  $\eta_g$  de l'ensemble bobine-convertisseur DC-DC (avec la commande associée), est indépendant de la variable d'état  $E_{sc}$ . Or, celui-ci dépend du courant  $i_L$  traversant la bobine et par conséquent de la tension des SCs (donc de  $E_{sc}$ ). La considération est faite que la résistance interne de la bobine ainsi que la profondeur de décharge des SCs sont suffisamment faibles pour considérer  $\eta_g$  comme indépendant de  $u_{sc}$ . La condition suffisante d'optimalité impose de respecter (II-31) afin d'assurer que cela correspond à un minimum du Hamiltonien.

$$\lambda \eta_g^{\gamma_g} r_b < 1 \quad (\text{II-31})$$

Afin d'illustrer le principe du *Calcul des Variations*, l'évolution du Hamiltonien en fonction de  $i_{b-ref}$ , pour un point de fonctionnement ( $i_p=200$  A) et une valeur arbitraire de  $\lambda$  est donnée Figure II-12. Il est intéressant de noter que dans notre cas le Hamiltonien possède un minimum unique pour la valeur de  $i_{b-ref}$  définie par (II-30).

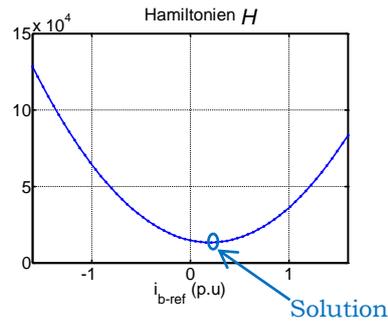


Figure II-12: évolution du Hamiltonien en fonction de  $i_{b-ref}$  pour  $i_p=200$  A

### II.3.3.3 Prise en compte des contraintes sur la variable d'état : $\lambda$ -control

Le paramètre clé de la stratégie est le multiplicateur de Lagrange  $\lambda$ . Il est nécessaire de déterminer une valeur appropriée pour ce paramètre. Parmi les différents critères relatifs aux stratégies applicables en temps réel, il est nécessaire d'assurer le fonctionnement du système en toute sécurité. Cela revient à respecter les limitations physiques du système pour tout cycle de conduite. En d'autres termes, il faut s'assurer que la condition (II-15)<sup>1</sup> soit respectée, et ce, dans tous les cas possibles. Une commande optimale de type BF est nécessaire. Le paramètre  $\lambda$  a été défini pour assurer la condition de « charge sustaining » (II-16) ; Afin d'assurer la condition (II-15) il faudrait introduire un second multiplicateur de Lagrange  $\lambda_2$  qui ne serait valable que pour le cycle de conduite de référence (i.e. celui pour lequel  $\lambda_2$  serait déterminé). Des limites à l'approche peuvent être donc mises en évidence.

Premièrement, la complexité (i.e. détermination de deux paramètres  $\lambda$  et  $\lambda_2$  de manière itérative), et en second lieu le respect « partiel » du critère de sécurité (i.e. valable que pour un cycle connu *a priori*). Le  $\lambda$ -control consiste à modifier la valeur du paramètre  $\lambda$  par l'intermédiaire d'une boucle d'asservissement sur la variable d'état afin de respecter la contrainte (II-15). Cette approche a été utilisée dans plusieurs applications de véhicules multi sources. Kessels et.al. ont utilisé cette approche pour un poids lourd hybride (carburant fossile-batterie) [Kessels 2008]. O. Da Fonseca a utilisé le  $\lambda$ -control pour un système d'alimentation PàC-batterie [Naiff da Fonseca 2013]. Nguyen et.al ont utilisé ce type de stratégie, pour un système batterie-SCs avec un convertisseur DC-DC unidirectionnel en courant, alimentant un système d'assistance à la propulsion d'un véhicule [Nguyen 2014].

La structure du  $\lambda$ -control utilisée dans le travail présenté est montrée Figure II-13. La nouvelle expression de la trajectoire optimale de  $i_{b-ref}$  est donnée par (II-32) avec  $\lambda_0$  la valeur initiale du multiplicateur de Lagrange, et  $\Delta\lambda$  la sortie du correcteur assurant la limitation de la tension des SCs. La valeur de  $\lambda_0$  est déterminée itérativement sur un cycle connu, afin de respecter la condition de « charge sustaining » (II-16). Les itérations sont réalisées en simulant le modèle d'optimisation. Ce modèle ne nécessitant que très peu de ressources numérique, cela permet d'effectuer plusieurs itérations avec un temps de calcul limité. Les résultats sont aussi liés au correcteur utilisé. La valeur de  $\lambda_0$  dépend des paramètres du

<sup>1</sup> La condition (II-15) regroupe les bornes maximale et minimale de la tension des SCs. La sécurité est relative à la borne maximale de la tension des SCs. La borne minimale est relative au rendement.

correcteur. Un correcteur de type Proportionnel-Intégral (PI) a été utilisé dans les travaux cités précédemment. Un correcteur proportionnel a été utilisé ici car le système à contrôler est de type intégrateur pur. La synthèse du correcteur est détaillée en Annexe F.

$$i_{b-ref}^*(t) = \frac{\lambda_{ref} \eta_g^{Y_g} (OCV + r_b i_{p-mes})}{2(\lambda_{ref} r_b \eta_g^{Y_g} - 1)} \quad \text{avec} \quad \lambda_{ref} = \lambda_0 + \Delta\lambda \quad (\text{II-32})$$

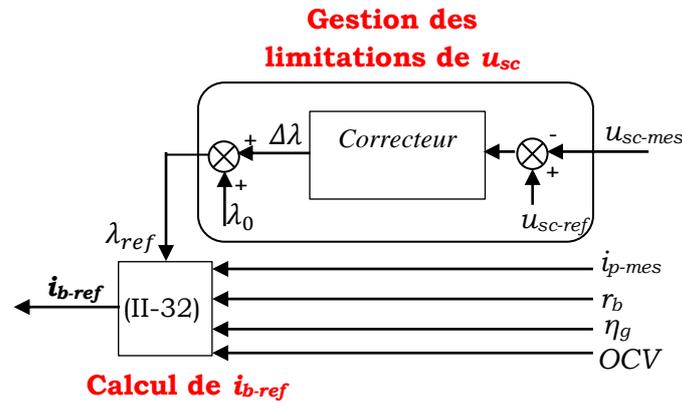


Figure II-13: structure de la stratégie du  $\lambda$ -control

La stratégie agissant par l'intermédiaire d'un retour sur l'image de la variable d'état ( $u_{sc}$ ), la structure de la commande optimale correspond à une boucle fermée (Figure II-9).

La partie suivante présente des résultats de simulations relatifs à l'application de la stratégie développée au véhicule batterie-SCs étudié. La valeur initiale  $\lambda_0$  du multiplicateur de Lagrange est déterminé de manière itérative sur le cycle de conduite de référence (connu *a priori*), afin que la tension des SCs soit la même au début et à la fin du cycle de conduite (cf. § précédent). Il est important de noter que la détermination de  $\lambda_0$  se fait sur des simulations du *modèle d'optimisation* (Figure II-11.b). Cela permet de réduire considérablement le temps de calcul et donc d'effectuer plus rapidement les itérations. Le modèle d'optimisation est donc pleinement dédié à la *synthèse de la stratégie* (résolution analytique du problème et détermination numérique de  $\lambda_0$ ). Le paramètre  $\eta_g$  est issu d'une cartographie définie par la simulation de l'ensemble convertisseur DC-DC, bobine de lissage et la commande associée. La valeur courante de  $\eta_g$  est déduite de la cartographie par la mesure de  $u_{sc}$  et le courant de référence  $i_{b-ref}$ .

## II.3.4 Résultats de simulations

### II.3.4.1 Paramètres

Les simulations sont effectuées par l'intermédiaire du logiciel Matlab-Simulink®. Elles sont réalisées sur la phase basse vitesse d'un cycle WLTC classe 2 (Figure II-14.a) [Tutuianu 2014] et dans le cas où le véhicule comporte deux passagers représentant une masse globale de 120 kg. Le profil de puissance du sous-système de propulsion relatif au véhicule avec batterie seule est présenté Figure II-14.b. Il est intéressant de remarquer que

la récupération d'énergie au freinage est relativement faible. Cela est dû, d'une part, à la nature du cycle de conduite et, d'autre part, à la stratégie de gestion d'énergie du freinage qui permet de récupérer au maximum la moitié de la puissance de freinage du véhicule (voir Annexe B). En ce qui concerne le VE batterie-SCs, les simulations sont effectuées sur le modèle dynamique complet du véhicule (REM et structure de commande, cf. Figure II-6). Les paramètres des simulations (modèles et stratégie) sont donnés dans le Tableau II-4. Par ailleurs, la majorité des résultats sont présentés en per unit (cf. Tableau II-4 pour les références du système unitaire). A noter que la limitation minimale de la tension des SCs ( $u_{sc-m}$ ) a été définie afin de rester dans une plage de rendement élevé des SCs [Barrade 2003]. La tension initiale  $u_{sc0}$  des SCs est déterminée afin de disposer de performances élevées des SCs au début du cycle. Plus la tension des SCs est élevée et plus le rendement interne est important. La valeur de  $u_{sc0}$  est fixée à 90 % de la tension maximale  $u_{sc-M}$  des SCs.

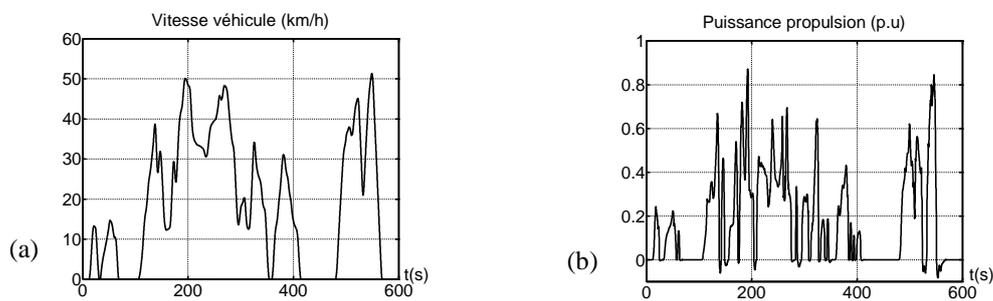


Figure II-14: (a) cycle WLTC classe 2, phase de basse vitesse ; (b) profil de puissance du sous-système de propulsion pour le VE avec batterie seule

Tableau II-4: paramètres des simulations

Eléments	Paramètres
Batterie	$u_{b-nom}=80 \text{ V}$   $C_{b-nom}=160 \text{ Ah}$   $E_{b-nom}=12,8 \text{ kWh}$ $r_b \in [7,2 \text{ m}\Omega ; 9,4 \text{ m}\Omega]$   $OCV \in [73,4 \text{ V}; 90,4\text{V}]$ $i_{b-M}=480 \text{ A}$   $i_{b-m}=-480 \text{ A}$   $SoC_0: 90 \%$
Bobine de lissage	$r_L=10 \text{ m}\Omega$   $L=0,2 \text{ mH}$ $\Delta i_{L-max}=18,75 \text{ A}$   $f_{sw}=10 \text{ kHz}$
SCs	$45 \text{ V}$   $r_{sc}=3,8 \text{ m}\Omega$   $C_{sc}=290 \text{ F}$ $u_{sc-M}=45 \text{ V}$   $290 \text{ F}$   $u_{sc-m}=0,65u_{sc-M}$   $u_{sc0}=0,9u_{sc-M}$ $i_{sc-M}=15 \times 380 \text{ A}$   $i_{sc-m}=15 \times -380 \text{ A}$
$\lambda_0$	-0,634
Per unit	Puissance : 15 kW   Tension batterie : 80 V Tension SCs : 45 V   Courants : 187,5 A

### II.3.4.2 Résultats de simulations

Les résultats qui suivent visent d'une part à illustrer le fonctionnement de la stratégie développée, et d'autre part à mettre en évidence l'apport de l'utilisation des SCs

dans le VE batterie-SCs par rapport à un VE batterie seule. Les deux véhicules transportent les mêmes passagers. Le VE batterie-SCs est donc plus lourd (masse des SCs et du convertisseur DC-DC). L'évolution du courant de la batterie est représentée (Figure II-15.a) pour les deux véhicules. Il est intéressant de remarquer que le courant de la batterie est globalement lissé dans le cas du VE batterie-SCs par rapport au VE avec batterie seule. Le système batterie-SCs assure donc son objectif principal qui est de réduire les sollicitations de la batterie afin d'augmenter sa durée de vie. L'évolution de la tension des SCs est représentée Figure II-15.b. La stratégie de gestion d'énergie assure bien la sécurité du système en permettant de respecter les limitations haute ( $u_{sc-M}$ ). Elle permet également d'assurer un bon rendement des SCs, et d'éviter des instabilités [Lhomme 2005], en assurant la limitation basse ( $u_{sc-m}$ ) de la tension des SCs. De plus, la condition de « charge sustaining » est respectée ( $u_{sc}(t_0) = u_{sc}(t_f)$ ). Or, le paramètre  $\lambda_0$  permettant de respecter cette condition a été déterminée à partir du modèle d'optimisation. La conclusion peut être faite que les dynamiques liées à la commande « locale » ont peu d'influence sur la stratégie de gestion d'énergie. Par ailleurs, la valeur efficace du courant de la batterie qui est le critère de performance de la stratégie est présentée Figure II-16. La stratégie de  $\lambda$ -control permet une réduction de 15 % de la valeur efficace du courant de la batterie par rapport au VE batterie seule. Enfin, il est intéressant de noter que le SoC de la batterie à la fin du cycle de conduite est très légèrement inférieur dans le cas du VE batterie-SCs à la celui obtenu pour le VE avec batterie seule (différence de 0,07 %). La condition de « charge sustaining » étant respectée (i.e. bilan énergétique nul pour les SCs), cela signifie que l'augmentation relative de la masse du véhicule ainsi que les pertes dans le convertisseur DC-DC et la bobine de lissage, ont eu dans ce cas (cycle effectué), très peu d'influence sur la consommation de charges de la batterie.

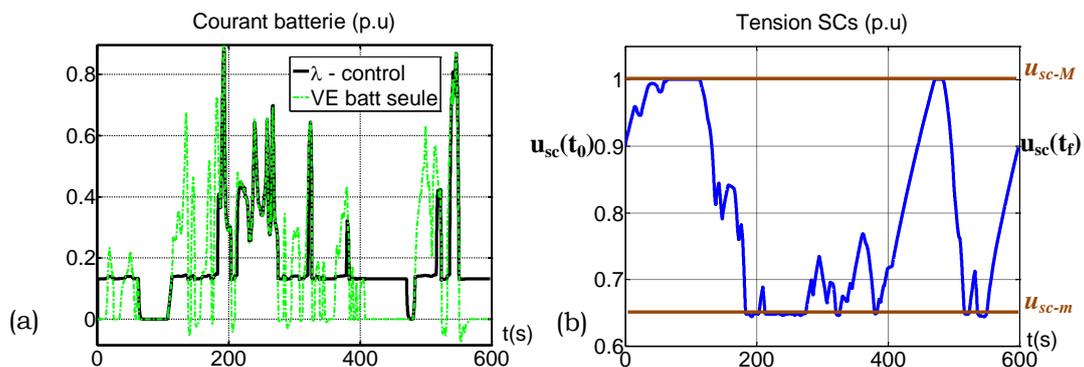


Figure II-15 : simulations sur le WLTC, (a) courant de la batterie pour le VE batterie seule et le VE batterie-SCs, (b) tension des SCs pour le VE batterie-SCs

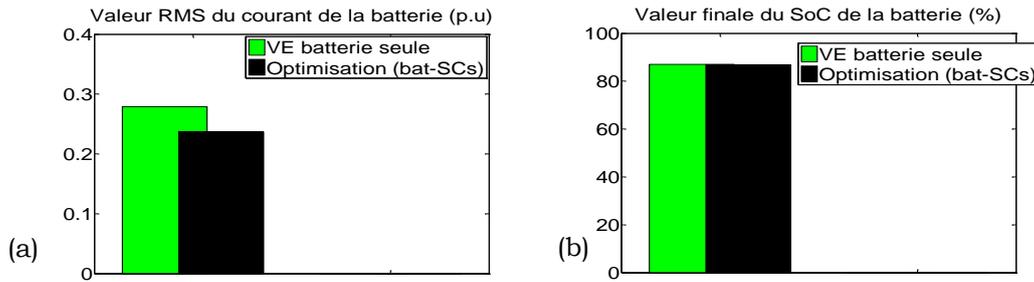


Figure II-16: (a) valeur efficace du courant de la batterie, (b) SoC de la batterie à la fin du cycle

La stratégie développée répond bien au cahier des charges défini. En effet l'implantation de la stratégie ne nécessite pas de temps de calcul prohibitif (i.e. *applicabilité*). En effet, la stratégie consiste à effectuer des opérations simples (additions, soustractions, multiplications, divisions). De plus, la stratégie permet d'assurer les limitations de la tension des SCs (*sécurité, rendement et stabilité*) et enfin de minimiser la valeur efficace du courant de la batterie de manière significative (*performances*).

## II.4 Extension à d'autres véhicules à 2 sources

Une stratégie à base d'optimisation a été définie pour un sous-système d'alimentation batterie-SCs avec un unique convertisseur DC-DC. La principale originalité de ce travail se situe dans la formalisation du problème d'optimisation (cf. II.3.2) qui a été réalisé par l'intermédiaire de la REM. L'objectif de cette partie est d'étendre l'approche de formalisation à d'autres types de sous-systèmes d'alimentation en énergie à deux sources. Deux sous-systèmes d'alimentation font l'objet de l'étude. Le premier est un système batterie-SCs avec deux convertisseurs DC-DC en parallèle. Dès lors, la différence par rapport au système précédent se situe dans l'architecture du système. Le second système est un sous-système d'alimentation PàC<sup>1</sup>-SCs avec deux convertisseurs en parallèle. Par conséquent, il y a une différence en plus par rapport au système étudié jusqu'à maintenant qui se situe au niveau de la source principale. En effet le système PàC n'est pas réversible en puissance. Les deux architectures sont présentées Figure II-17.

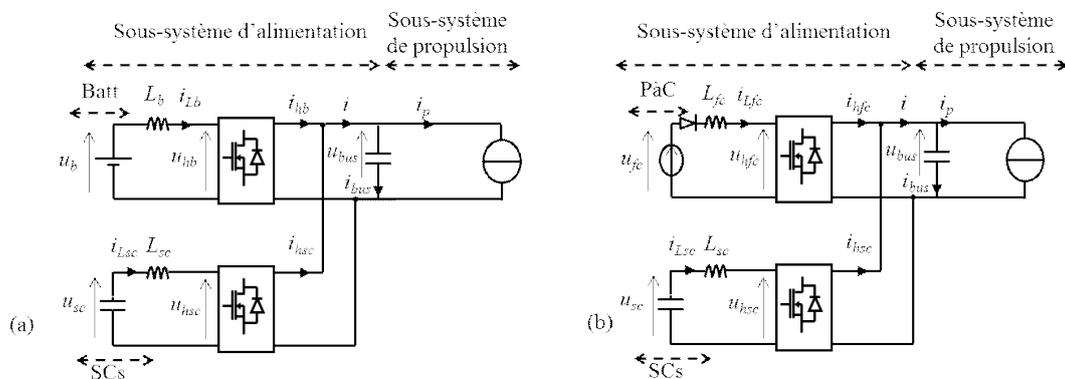


Figure II-17: architectures, (a) VE batterie-SCs à 2 convertisseurs, (b) VE PàC-batterie

<sup>1</sup> Le système PàC regroupe le stockage de H<sub>2</sub> et le stack

## II.4.1 Véhicule électrique batterie-SCs avec 2 convertisseurs

### II.4.1.1 Architecture et modélisation du système

L'arrangement des cellules de la batterie est modifié. En effet, il y a 24 cellules en série dans l'architecture d'origine tandis qu'il y a deux branches en parallèle de 12 cellules chacune (en série) pour le VE avec deux convertisseurs. Cela est nécessaire car la tension du bus continu est celle de la batterie d'origine. En ce qui concerne la modélisation, les modèles sont les mêmes que ceux utilisés dans le § II.2.

### II.4.1.2 Dimensionnement des éléments

Les éléments définis § II.1.2 sont conservés. Cependant, l'ensemble convertisseur DC-DC, bobine de lissage est dupliqué. La masse du véhicule augmente de 4,4 kg par rapport à la structure précédente. La capacité du condensateur du bus DC a été dimensionnée afin de limiter les ondulations  $\Delta u_{bus}$  du bus DC. La capacité  $C_{bus}$  doit répondre à la condition (II-33) [Bernot 2002]. Les valeurs considérées sont  $i_L=187,5$  A,  $f_{sw}=10$  kHz et  $\Delta u_{bus-max}=4$  V (5 % de la valeur nominale). La capacité  $C_{bus}$  doit être supérieure à 1,2 mF dans le cas étudié. Les nouveaux paramètres sont présentés Tableau II-5. En ce qui concerne les paramètres qui ont été conservés (i.e. bobine de lissage, SCs), il faut se référer au Tableau II-4.

Tableau II-5 : paramètres du véhicule batterie-SCs avec deux convertisseurs

Eléments	Paramètres
Batterie	40 V; 12,8 kWh $R_b \in [3,6 \text{ m}\Omega ; 4,7 \text{ m}\Omega]$   $OCV \in [36,7 \text{ V} ; 45,2 \text{ V}]$ $i_{b-M}=2 \times 480 \text{ A}$   $i_{b-m}=2 \times -480 \text{ A}$
Convertisseur DC-DC	Masse convertisseur : 2 x 4,4 kg
Bus DC	$C_{bus}=2,2 \text{ mF}$

$$C_{bus} \geq \frac{i_L}{4f_{sw}\Delta u_{bus-max}} \quad (\text{II-33})$$

### II.4.1.3 REM et organisation de la commande du système

En ce qui concerne la REM du système, il y a trois nouveaux éléments qui sont ajoutés (Figure II-19). Le bus DC est représenté par un élément d'accumulation d'énergie dont le modèle correspondant est donné par la relation (II-34), avec  $C_{bus}$  la capacité du bus DC. La considération est faite que la puissance maximale pouvant transiter dans chaque branche est la même. Le modèle du convertisseur DC-DC de la batterie est représenté par un élément de conversion d'énergie. Le modèle de la bobine de lissage de la branche de la batterie est représenté par un élément d'accumulation d'énergie. L'élément de couplage électrique représente la connexion en parallèle du bus DC et le reste du système. La relation correspondante est donnée par (II-35).

$$\begin{cases} C_{bus} \frac{d}{dt} u_{bus} = i_{bus} \\ i_{bus} = i - i_p \end{cases} \quad (\text{II-34})$$

$$\begin{cases} i_{hsc} + i_{hb} = i \\ u_{bus} \text{ commun} \end{cases} \quad (\text{II-35})$$

La structure de commande du sous-système d'alimentation est déterminée afin d'assurer l'**objectif global** des sources qui est de maintenir la tension de bus  $u_{bus}$  à la valeur désirée. Les chaînes de réglage correspondantes, sont définies de telle sorte à ce que les deux branches contribuent à l'asservissement de la tension du bus DC (Figure II-18). La structure de commande est présentée Figure II-19.

Le point clé dans la réalisation de la structure de commande du système est l'inversion du couplage entre le sous-système d'alimentation et le reste du système (II-36). En effet, cette inversion va conditionner la sollicitation des sources d'énergie. Il faut définir 2 sorties  $i_{hb-ref}$  et  $i_{hsc-ref}$ , à partir d'une entrée  $i_{ref}$ . Une autre entrée de répartition doit par conséquent être définie [Allègre 2010b]. Cette entrée est la variable de commande, sortie de la stratégie de gestion d'énergie. Deux possibilités de variables de commande sont considérées dans cette étude. Celles-ci sont mises en évidence Figure II-19. La première est le courant de référence du convertisseur de la batterie  $i_{hb-ref}$ . La seconde variable de commande potentielle est le courant de référence du convertisseur des SCs  $i_{hsc-ref}$ .

Le choix de la variable de commande appropriée est fait selon des critères relatifs à celle-ci. Ces critères sont définis ci-dessous par ordre de priorité :

- a) *Limitations associées à la variable de commande* : il est plus judicieux de choisir comme variable de commande celle ayant les limitations les plus contraignantes. En effet, le respect de ces limitations peut être directement imposé dans la stratégie. La variable de commande choisie peut être par exemple saturée dans la stratégie. Dans le système étudié le courant  $i_{hb-ref}$  comporte les limitations les plus importantes car il directement lié au courant de la batterie (limitations en charge et en décharge). Ce critère est lié à la *sécurité* du système.
- b) *Objectif de l'association des sources* : il s'avère plus intéressant de choisir pour variable de commande celle ayant les liens les plus étroits avec le but de l'association des sources entre elles. Cela correspond aux **objectifs internes** des sources. Les SCs ont été incorporés afin d'augmenter la durée de vie de la batterie. Le courant de référence  $i_{hb-ref}$  est étroitement lié à cet objectif. En effet, la durée de vie de la batterie est directement liée au courant qui lui est imposé. Ce critère est relatif aux *performances* du système

Le choix se porte donc vers le courant  $i_{hb-ref}$  comme variables de commande. A noter que s'il y a conflit entre les critères (i.e. une variable -> un critère) c'est le critère de *sécurité* du système (critère (a)) qui prévaut. En somme, la REM permet de trouver les différentes possibilités pour les variables de commande. Ensuite le choix est déduit d'une analyse.

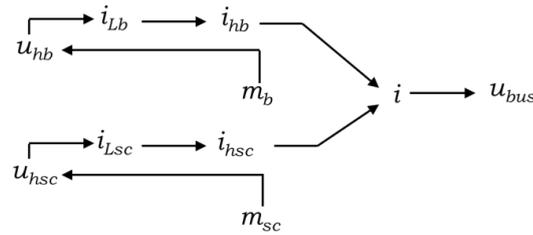


Figure II-18 : chaînes de réglages

$$i_{hsc-ref} + i_{hb-ref} = i_{-ref} \quad (II-36)$$

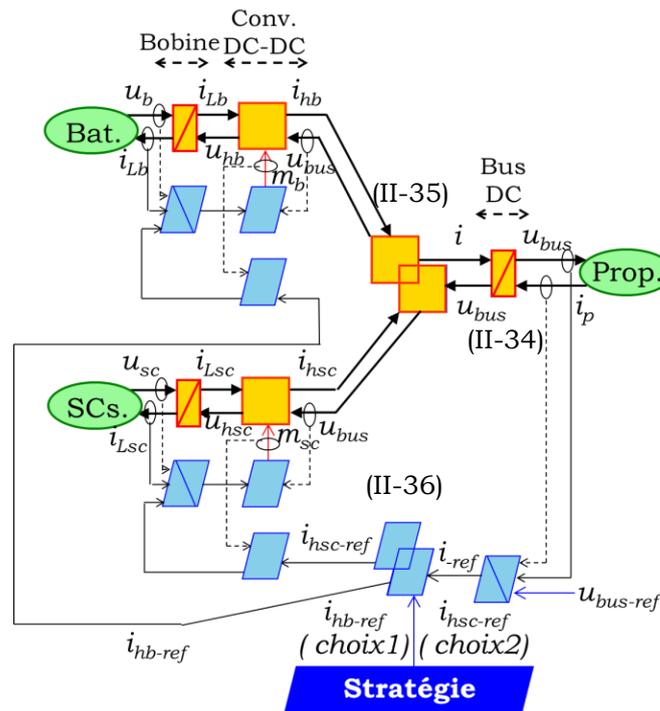


Figure II-19: REM et structure de commande du VE batterie-SCs avec deux convertisseurs

#### II.4.1.4 Formulation du problème d'optimisation

La procédure utilisée dans le § II.3.2 est utilisée afin de formuler le problème de commande optimale.

0. *Définition de la REM du système et déduction de la structure de commande associée* : cette étape a été détaillée précédemment (Figure II-19).
1. *Définition des critères de performances* : le critère de performance est conservé. Il s'agit de minimiser la valeur efficace du courant de la batterie  $i_{Lb}$ .
2. *Définitions des variables du problème et des contraintes associées* : les sources d'énergies étant de même nature, et leur rôle étant identique (batterie source « principale », SCs « tampon » énergétique), la variable d'état est toujours l'énergie  $E_{sc}$  aux bornes du banc de SCs. D'après la structure de commande du système (Figure II-19), la variable de commande à imposer est le courant  $i_{hb-ref}$ . En ce qui concerne les variables

exogènes, elles sont mises en évidence par la structure de commande du sous-système d'alimentation (Figure II-19). La tension de référence  $u_{bus-ref}$  du bus DC est imposée de manière externe. C'est une variable exogène. Par ailleurs, le courant  $i_p$  est également imposé de manière externe. Par conséquent, il est une variable exogène. La synthèse des variables du problème de commande optimale est donnée Tableau II-6.

3. *Description mathématique du problème de commande optimale* : la prochaine étape consiste à définir une description mathématique du problème (cf. § II.3.2). Un modèle réduit du système est défini en réduisant la REM et la structure de commande du système. Les ensembles réduits sont encadrés par des tirets bleus (cf. Figure II-20.a). Le couplage reste l'élément essentiel (action de la stratégie). Dès lors, celui-ci n'est pas sujet à une éventuelle réduction. Il est maintenu dans le modèle réduit. Les ensembles bobines de lissages – convertisseurs DC-DC et les commandes associées sont réduits. L'élément nouveau ici par rapport à l'architecture étudiée précédemment (cf. II.3.2) est la gestion du bus DC. Avec l'hypothèse que les courant  $i_{sc-ef}$  et  $i_{hb-ef}$  sont bien contrôlés, l'ensemble bus DC et correcteur associé peut-être réduit. L'élément correspondant doit comporter les mêmes entrées et sorties que l'ensemble d'origine. Les relations correspondant au modèle réduit du bus DC et de son correcteur sont données par (II-37) avec  $\eta_{bus}$  le rendement du bus DC (pertes dues à la résistance interne). Le modèle du bus DC utilisé dans le cas présenté ne comporte pas de résistance interne (II-34). Le rendement  $\eta_{bus}$  est donc égal à 1. La REM et la structure de commande du modèle d'optimisation sont présentées (Figure II-20.b). Le détail de l'étape de réduction du modèle complet est présenté en Annexe E.

$$\begin{cases} u_{bus} = u_{bus-ref} \\ u_{bus}i = u_{bus}i_p\eta_{bus}^{\gamma_{bus}} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{bus} = -1, i_p > 0 \\ \gamma_{bus} = 1, i_p \leq 0 \end{cases} \\ i = i_{-ref} \\ i_{-ref} = i_p\eta_{bus}^{\gamma_{bus}} \end{cases} \quad (II-37)$$

Tableau II-6 : synthèse des variables du problème pour le VE batterie-SCs avec deux convertisseurs

Type de variable	Choix	Contrainte(s)	Limitation(s) (contraintes inégalités)
Variable d'état $x$	Energie des SCs, $E_{sc}$ (Analyse)	$u_{sc}(t_f) = u_{sc}(t_0)$	$u_m \leq u_{sc}(t) \leq u_M$
Variable de commande $u$	Courant de référence du convertisseur batterie $i_{hb-ref}$ (REM suivie d'une analyse des possibilités)		$i_{hb-m} \leq i_{hb-ref} \leq i_{hb-M}$
Variables exogènes	Courant du sous-système de propulsion, $i_p$ Tension de référence du bus DC, $u_{bus-ref}$ (REM)		

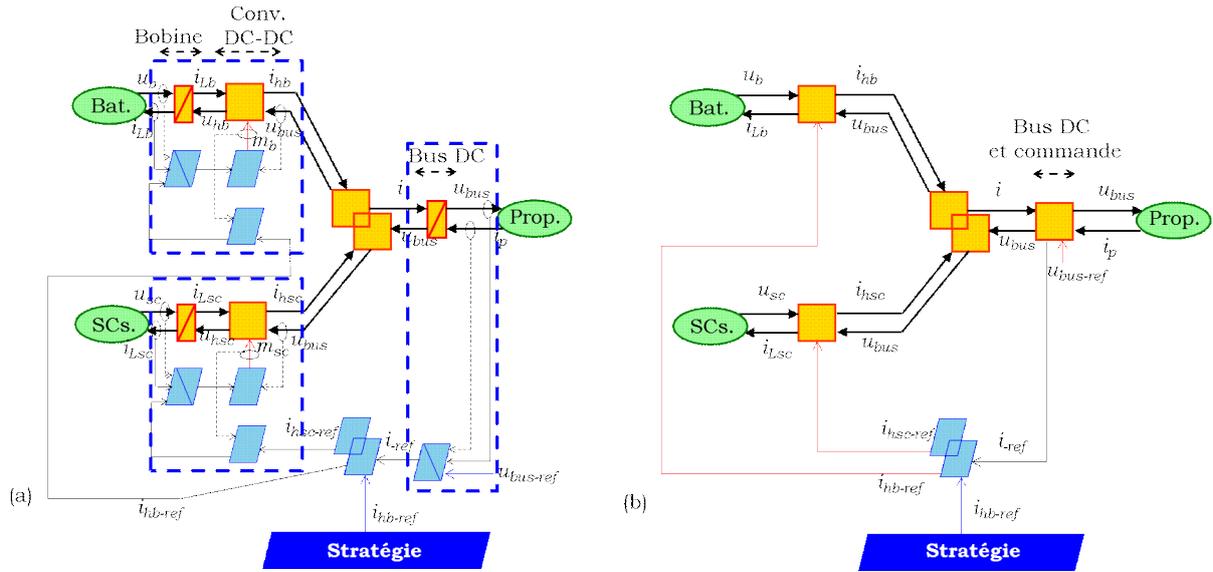


Figure II-20 : (a) REM et structure de commande du modèle dynamique, (b) REM et structure de commande du modèle réduit (modèle d'optimisation)

Le critère de performance est exprimé en fonction de la variable de commande  $i_{hb-ref}$  par la relation (II-38). Plus de détails sur les calculs sont donnés en Annexe F.

$$J_2 = \sqrt{\frac{1}{T_{cycle}} \int_{t_0}^{t_f} \frac{(OCV - \sqrt{OCV^2 + 4i_{hb-ref} \eta_{gb}^{y_{gb}} u_{bus} r_b})^2}{4r_b^2} dt} \quad (II-38)$$

#### II.4.1.5 Résolution du problème d'optimisation

La méthode du  $\lambda$ -control est utilisée afin d'assurer le fonctionnement du système en sécurité (limitations de la tension des SCs). L'objectif de cette partie est de montrer que la méthode de formulation s'applique à d'autres architectures, la méthode de résolution ne fait pas partie de l'objet du travail. Par conséquent cette étape est détaillée en Annexe F. L'expression de la variable de commande  $i_{hb-ref}$  est donnée par :

$$i_{hb-ref}^* = \frac{OCV^2 (2\eta_{gb}^{y_{gb}} \eta_{gsc}^{y_{gsc}} \lambda_{ref} - r_b \eta_{gsc}^{2y_{gsc}} \lambda_{ref}^2)}{u_{bus} (4r_b^2 \eta_{gb}^{y_{gb}} \eta_{gsc}^{2y_{gsc}} \lambda_{ref}^2 - 8\eta_{gb}^{2y_{gb}} \eta_{gsc}^{y_{gsc}} \lambda_{ref} r_b + 4\eta_{gb}^{2y_{gb}})} \quad (II-39)$$

#### II.4.1.6 Résultats de simulations

Les simulations sont effectuées sur le modèle dynamique du véhicule. La valeur initiale  $\lambda_0$  de  $\lambda_{ref}$  a été déterminée sur le modèle réduit (simulations), pour respecter la condition de charge « sustaining » et est égale à -2,661. Tout d'abord, l'hypothèse du bus DC comme source de tension parfaite est vérifiée d'après les résultats Figure II-21.a. De plus la tension de la batterie varie très peu (Figure II-21.b). Les évolutions du courant du sous-

système de propulsion  $i_p$  et de celui du convertisseur DC-DC de la batterie  $i_{hb}$  sont représentées Figure II-22. La stratégie tend à lisser le courant  $i_{hb}$  qui est l'image du courant de la batterie. D'après l'évolution de la tension des SCs (Figure II-22.b), le  $\lambda$ -control permet de maintenir la tension des SCs entre les limites désirées. Le critère de performance est la valeur efficace du courant dans la batterie. Etant donné que l'arrangement des cellules a été modifié (deux branches en parallèles de 12 cellules en série chacune) il faut ramener le critère de performances à l'échelle de la cellule. En effet l'objectif du système est de diminuer les sollicitations sur la batterie (i.e. sur chaque cellule). D'après les résultats Figure II-23.a il y a une diminution de 14 % de la valeur efficace du courant d'une cellule de la batterie par rapport au VE batterie seule. Par ailleurs, il y a une légère augmentation par rapport au VE batterie-SCs de l'architecture précédente (Figure II-16). Cela est dû notamment aux pertes occasionnées par le convertisseur DC-DC de la batterie. Enfin la consommation de la batterie est très peu affectée. En effet, la valeur finale du SoC de la batterie est équivalente entre le VE avec batterie seule et le VE batterie-SCs (Figure II-23.b)).

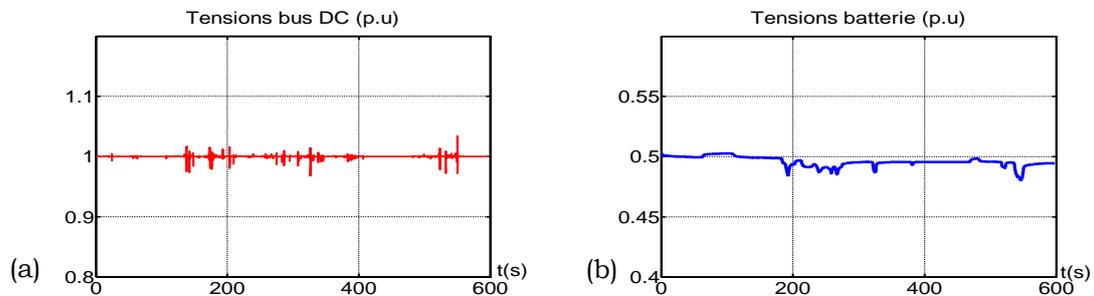


Figure II-21 : simulations sur le WLTC, (a) tension du bus DC, (b) tension de la batterie

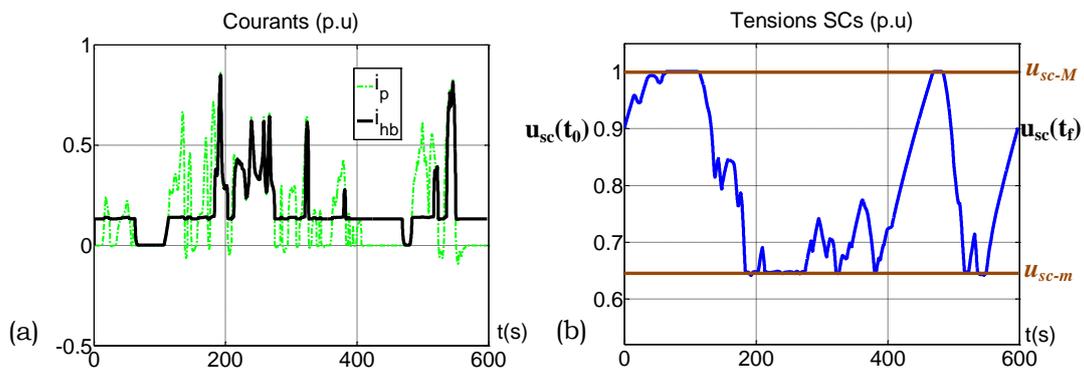


Figure II-22 : simulations sur le WLTC, (a) courants du couplage, (b) tension des SCs

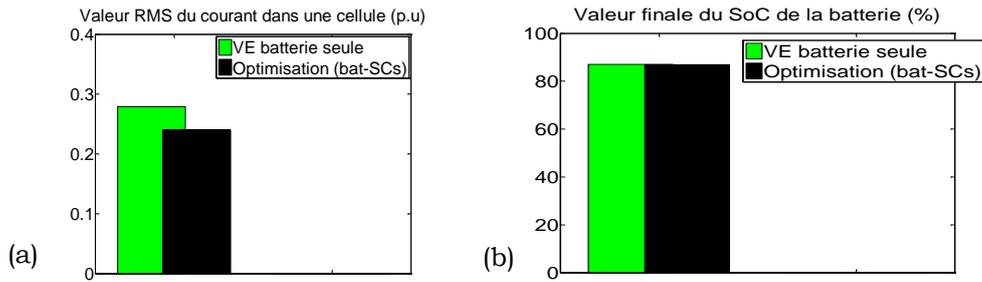


Figure II-23 : (a) valeur efficace du courant de la batterie (une cellule), (b) valeur finale du SoC

## II.4.2 Véhicule à Pile à Combustible

### II.4.2.1 Architecture et modélisation du système

L'architecture du véhicule a été présentée Figure II-17.b. Dans ce véhicule, la source de priorité principale du sous-système d'alimentation est une PàC. Elle assure l'autonomie du véhicule. L'objectif interne des SCs est d'augmenter la durée de vie de la PàC en adaptant les sollicitations qui lui sont imposées (cf. Tableau II-7). Des architectures PàC-SCs ont fait l'objet de plusieurs travaux [Payman 2008], [Thounthong 2010], [Azib 2010a]. La PàC de référence est issue de la littérature [Corbo 2011]. Ses caractéristiques principales sont présentées Tableau II-8. La modélisation de la PàC est réalisée à l'aide d'une courbe de polarisation [Chan 2001], [Chrenko 2008], [Boulon 2009], [Gauchia Babé 2009] donnée par le constructeur pour un stack<sup>1</sup> de la PàC (Figure II-24). Cette courbe ne permet pas d'identifier les différentes dynamiques liées à la tension du stack, mais elle prend en compte les principales pertes dans celui-ci (i.e. chutes de tension). Par ailleurs, une constante de temps est incorporée pour prendre en compte les dynamiques liées à la réponse en tension du stack. La valeur de la constante de temps est imposée à 10 ms [Boscaino 2015]. C'est un modèle quasi-statique. Les modèles des autres éléments sont conservés (cf. II.2 et II.4.1).

Tableau II-7 : cahier des charges des sources du véhicule PàC-SCs

Source	Cahier des charges	Priorité
PàC	Assurer l'autonomie du véhicule	Source principale
SCs	Augmenter la durée de vie de la PàC	Source secondaire

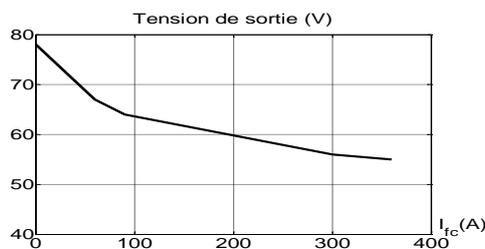


Figure II-24 : courbe de polarisation d'un stack de la PàC utilisée

<sup>1</sup> Voir définition § I.2.2

### II.4.2.2 Dimensionnement des éléments

Le banc de SCs ainsi que les convertisseurs DC-DC (avec les bobines de lissage) sont conservés. Dans cette étude, la PàC remplace la batterie du véhicule d'origine, c'est la source principale. Le dimensionnement de la PàC (i.e. nombre de stacks, masse de H<sub>2</sub> embarquée et dispositif de stockage associé) est déterminé suivant un critère de puissance et un critère énergétique. La PàC étant la source principale du véhicule, elle doit pouvoir assurer un fonctionnement en mode dégradé de celui-ci en cas de perte des SCs (source secondaire). En ce qui concerne la masse de H<sub>2</sub> embarquée, elle est relative à l'autonomie du véhicule. Le système de stockage d'énergie de référence est un des réservoirs de la Toyota Mirai. Par ailleurs, l'ensemble doit être compatible avec les exigences de masse et de volume fixées dans le cas d'étude présenté. Le dimensionnement est présenté en Annexe G. Les caractéristiques principales du système PàC sont données Tableau II-8.

Tableau II-8: paramètres du véhicule PàC-SCs

Eléments	Paramètres
Stack	Type : PEMFC <sup>1</sup> Puissance maximale : 20 kW   Plage de tension : 50-80 V Courant maximal : 360 A   Masse : 24 kg
Stockage de H <sub>2</sub>	Masse de H <sub>2</sub> embarquée : 2,4 kg   Masse global du stockage 44,5 kg
Arrangement	Nombre de stacks en série : 1   Nombre de stacks en parallèle : 1

### II.4.2.3 Organisation de la commande du système

La REM du véhicule est structurellement la même que celle du véhicule batterie-SCs avec deux convertisseurs (Figure II-19). La seule différence se fait au niveau de la batterie qui est maintenant remplacée par le système PàC. La REM du véhicule PàC-SCs n'est par conséquent pas représentée dans ce paragraphe. La structure de commande du sous-système d'alimentation consiste à assurer l'objectif global de l'association des sources, qui est de fournir la puissance appelée par le sous-système de propulsion (asservissement de la tension  $u_{bus}$ ). La stratégie de gestion d'énergie consiste à assurer les objectifs internes des sources (répartition des flux d'énergie). La structure de commande est la même que pour le VE batterie-SCs à deux convertisseurs (Figure II-19). La première possibilité de variable de commande est le courant de référence  $i_{hfc-ref}$  du convertisseur DC-DC de la PàC. La seconde possibilité est le courant de référence  $i_{hsc-ref}$  du convertisseur DC-DC des SCs.

Comme dans le cas d'étude précédent, le choix de la structure de commande appropriée est fait sur deux critères relatifs à la variable de commande potentielle (i.e.  $i_{hsc-ref}$  ou  $i_{hfc-ref}$ ) :

- Limitations associées à la variable de commande* : dans le système étudié, le courant de référence  $i_{hfc-ref}$  comporte les contraintes les plus importantes. En effet, il faut en

<sup>1</sup> Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (cf. § 1.2.2)

premier lieu interdire le fonctionnement en charge de la PàC. Cela consiste à imposer  $i_{hfc-ref}$  positif en convention générateur. De plus, les limitations maximales de courants sont plus importantes que pour les SCs. Enfin, il est nécessaire de pouvoir adapter les dynamiques de  $i_{hfc-ref}$  afin de ne pas détériorer la PàC [Thounthong 2009a].

- b) *Objectif de l'association des sources* : l'objectif de l'association des SCs à la PàC, est d'augmenter la durée de vie de la PàC. La durée de vie de la PàC est directement liée aux modes de fonctionnements du véhicule. Les modes de fonctionnement influençant la dégradation de la PàC sont présentés dans [Naiff da Fonseca 2013]. Parmi ces modes de fonctionnement, il y a les variations de puissance appelée ainsi que les fortes demandes de puissances. Or cela est relatif au courant imposé à la PàC. Le courant de référence  $i_{hfc-ref}$  est par conséquent directement lié à l'objectif du système, qui est d'augmenter la durée de vie de la PàC.

Le choix se porte vers le courant  $i_{hfc-ref}$  comme variable de commande.

#### II.4.2.4 Formulation du problème d'optimisation

La procédure du § II.3.2 est reprise pour la formulation du problème de commande optimale.

0. *Définition de la REM du système et déduction de la structure de commande associée* : cette étape a été abordée précédemment.
1. *Définition des critères de performances*: des variations importantes de puissances appelée ainsi que de fortes demandes de puissance sont néfastes pour la durée de vie de la PàC [Pei 2008], [Thounthong 2009a], [Robin 2013], [Naiff da Fonseca 2013]. La minimisation de la valeur efficace du courant de la PàC est une manière de limiter ces deux modes de fonctionnement. Le critère de performance  $J_3$  est exprimé par la relation (II-40) avec  $i_{Lfc}$  le courant de la PàC.

$$J_3 = \sqrt{\frac{1}{T_{cycle}} \int_{t_0}^{t_f} i_{Lfc}^2 dt} \quad (\text{II-40})$$

2. *Définitions des variables du problème et des contraintes associées* : les SCs ayant toujours le même rôle que pour les véhicules étudiés précédemment (source secondaire), la variable d'état est l'énergie  $E_{sc}$  du banc de SCs. D'après la structure de commande du système, la variable de commande est le courant de référence  $i_{hfc-ref}$  du convertisseur DC-DC de la PàC. En plus des limitations de courant maximal et minimal, une limitation sur le gradient du courant  $i_{hfc-ref}$  est imposée. Celle-ci s'exprime par (II-41) avec  $di_{hfc-M}$  la pente maximale admise. En ce qui concerne les variables exogènes associées à la commande du système, ce sont les mêmes que pour le véhicule batterie-SCs avec deux convertisseurs (i.e.  $i_p$  et  $U_{bus-ref}$ ). En effet, la REM et la structure de commande des deux systèmes sont les mêmes. Les variables du problème sont données Tableau II-9.

$$\left| \frac{d}{dt} i_{hfc-ref} \right| \leq di_{hfc-M} \quad (\text{II-41})$$

3. *Description mathématique du problème de commande optimale:* En ce qui concerne la description mathématique du problème, le modèle d'optimisation est réalisé avec les mêmes considérations que dans le cas d'étude précédent. La REM et la structure de commande relatives au modèle d'optimisation sont identiques à celles présentées Figure II-20.b (indice 'b' pour la batterie remplacé par 'fc' pour la PàC). Les modèles des sources sont conservés pour le modèle d'optimisation, dont les relations sont les mêmes que celles du modèle d'optimisation du sous-système d'alimentation batterie-SCs avec deux convertisseurs (cf. Annexe E).

Tableau II-9: synthèse des variables de commande pour le VE PàC-SCs

Type de variable	Choix	Contrainte(s)	Limitation(s) (contraintes inégalités)
<b>Variable d'état x</b>	<i>Idem à VEs batterie-SCs</i>	$u_{sc}(t_f) = u_{sc}(t_0)$	$u_m \leq u_{sc}(t) \leq u_M$
<b>Variable de commande u</b>	Courant de référence du convertisseur de la PàC $i_{hfc-ref}$ (déduite par la REM suivie d'une analyse des possibilités)		$0 \leq i_{hfc-ref} < i_{hfc-max}$ $\left  \frac{d}{dt} i_{hfc-ref} \right  \leq di_{hfc-M}$
<b>Variables exogènes</b>	<i>Idem à VE batterie-SCs avec deux convertisseurs</i>		

#### II.4.2.5 Résolution du problème d'optimisation

La méthode du  $\lambda$ -control est utilisée afin d'assurer la limitation de la tension des SCs comme pour les deux cas d'étude précédents. Le courant  $i_{hfc-ref}$  est défini par la relation (II-42) avec  $\eta_{gfc}$  le rendement global de l'ensemble bobine de lissage-convertisseur DC-DC de la PàC.

$$i_{hfc-ref} = - \frac{\lambda_{ref} u_{fc}^2 \eta_{gsc}^{y_{gsc}}}{2 \eta_{gfc}^2 u_{bus}} \quad (\text{II-42})$$

#### II.4.2.6 Résultats de simulations

Les simulations sont effectuées sur le modèle dynamique du véhicule. La valeur initiale  $\lambda_0$  de  $\lambda_{ref}$  est déterminée de manière itérative comme dans les cas d'études précédents. Sa valeur est -0,76. Par ailleurs, il est nécessaire de limiter les dynamiques du courant de la PàC afin d'éviter des problèmes de manque de  $H_2^1$  pouvant détériorer la PàC. [Thounthong 2009a], [Solano-Martinez 2011]. D'après les données du constructeur, le gradient de courant maximal admis par la PàC est de 20 A.s<sup>-1</sup>. Le gradient du courant de référence  $i_{hfc-ref}$  est par conséquent limité. Par ailleurs, dans le véhicule réel, en cas de pertes

<sup>1</sup> Anglais « Fuel starvation »

des SCs, la commande du sous-système de propulsion (couple de référence de la machine électrique) serait adaptée afin de limiter les variations du courant du sous-système de propulsion (fonctionnement en mode dégradé). Cet aspect n'est pas pris en compte dans le travail présenté dans cette thèse. Le travail se focalise sur la commande du sous-système d'alimentation en énergie. Afin d'évaluer la stratégie de gestion d'énergie et l'apport de l'hybridation au véhicule, une comparaison à un véhicule PàC seul est réalisée. Dans le véhicule PàC seul, la PàC est interfacée au sous-système de propulsion par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC (adaptation de tension). L'hybridation permet de réduire les pics de courants imposés à la PàC (Figure II-25.a). D'autre part, la PàC subit moins d'arrêts intempestifs dans le cas du VH. Cela permet d'augmenter le rendement global de la PàC qui est très faible au démarrage (mise en marche des auxiliaires). Par ailleurs, le  $\lambda$ -control permet de respecter globalement les limitations sur la tension des SCs (Figure II-25.b). Cependant, il y a un léger écart entre la valeur désirée et la valeur obtenue au niveau des limitations basses dans certains cas. Cela est dû à la limitation du gradient du courant de référence du convertisseur de la PàC. Ce n'est pas problématique car la limitation la plus importante à respecter est celle concernant la tension maximale du banc de SCs (sécurité). La valeur efficace du courant de la PàC (critère de performance) est réduite de 18 % dans le cas du véhicule PàC-SCs Figure II-26.a. Cela favorise la durée de vie de la PàC. Par ailleurs, l'hybridation permet de réduire la consommation de H<sub>2</sub> de 4 %.

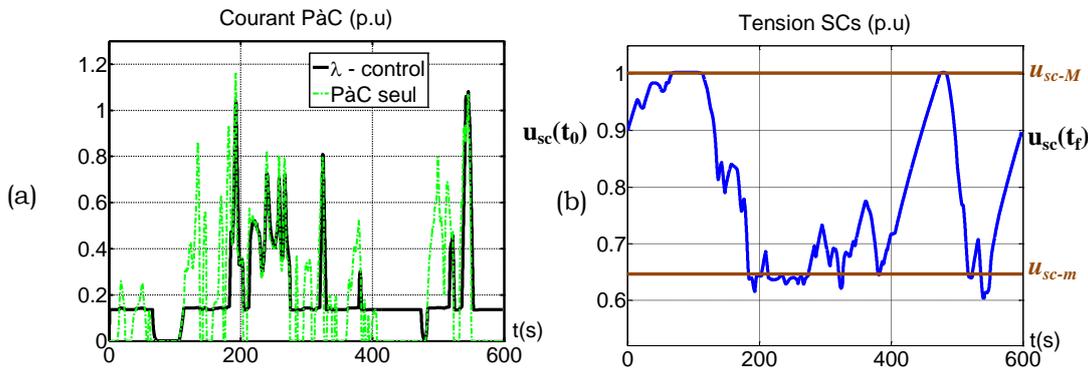


Figure II-25: (a) évolution du courant de la PàC, (b) tension des SCs (VH)

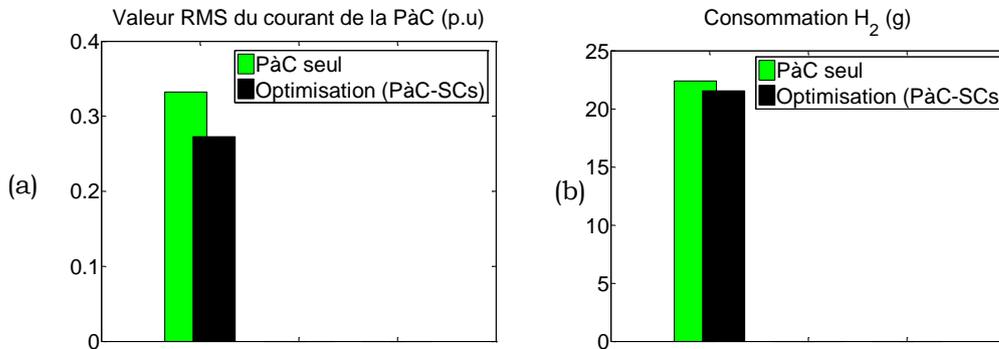


Figure II-26: (a) valeur efficace du courant de la PàC, (b) masse de H<sub>2</sub> consommée sur le WLTC classe 2

## II.5 Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était de présenter une méthode structurée pour développer des stratégies de gestion d'énergie basées sur l'optimisation, pour des véhicules à 2 sources de stockage d'énergie. L'analyse de la REM et de la structure de commande de chaque système a permis de formuler le problème de commande optimale, ce qui est une étape essentielle dans la définition d'une stratégie à base d'optimisation.

La formulation du problème de commande optimale a premièrement consisté à définir les variables du problème. Cela a pu être fait de manière aisée par l'intermédiaire de la REM, car celle-ci est basée sur le principe d'action-réaction entre les différents éléments du système étudié, ainsi que sur la causalité « physique » (causalité intégrale). Les entrées et sorties « physiques » des différents éléments sont par conséquent clairement définies. D'autre part, la distinction entre la commande dite « locale » et la stratégie de gestion d'énergie est mise en évidence. Les variables de commande possibles sont alors directement identifiables. La seconde étape de la formulation a été réalisée par la réduction de la REM et de la structure de commande du système étudié. Cela a permis de définir un modèle réduit pour l'optimisation, respectant les propriétés physiques du système. Des règles pour la réduction du modèle du système ont été établies. Il apparaît notamment que l'élément de couplage entre les sources doit être maintenu. En effet, l'action de la stratégie se fait à partir de l'inversion de l'élément de couplage. Le modèle réduit est essentiel pour la résolution du problème de commande optimale. Celui-ci permet de simplifier la description mathématique du problème.

La résolution du problème de commande optimale a été réalisée par l'intermédiaire du *Calcul des Variations* qui est basée sur le *Principe du Minimum de Pontriaguine*. Cette méthode de résolution a l'avantage de nécessiter un temps de calcul relativement faible, mais perd en performances dans le cas de limitations des variables d'état et de commande.

Afin d'assurer les limitations liées à la variable d'état (adaptation temps réel), la méthode du  *$\lambda$ -control* a été utilisée. Cette méthode consiste à adapter la valeur du paramètre clé (multiplicateur de Lagrange) du *Calcul des Variations* par une boucle d'asservissement assurant les limitations liées à la variable d'état, et ce, pour toute condition de conduite.

Les stratégies développées ont été testées par simulation. Dans le cas des véhicules batterie-SCs étudiés, la valeur efficace du courant de la batterie a été réduite d'environ 14 % par rapport au véhicule avec batterie seule. Dans le cas du véhicule PàC-SCs, la valeur efficace du courant de la PàC a été réduite de 18 % par rapport au véhicule avec PàC seule tout en réduisant la consommation de H<sub>2</sub> de 4 %.

La méthode développée est représentée Figure II-27. Le travail présenté contribue à la problématique de la thèse qui est de structurer la gestion d'énergie pour des véhicules multi-sources. La structuration réalisée par l'intermédiaire de la REM a contribué à la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie. Les principes développés ici vont être appliqués à des véhicules de 3 sources et plus dans le chapitre suivant.

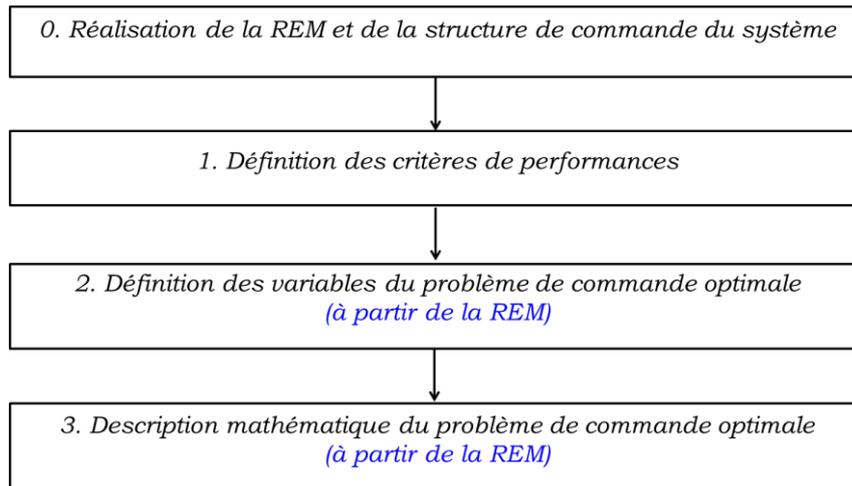


Figure II-27: méthode développée pour la formulation du problème de commande optimale

# Chapitre III : Structuration de la gestion d'énergie pour un véhicule à 3 sources

## Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode pour la réalisation de la gestion d'énergie d'un véhicule électrique à 3 sources. La gestion d'énergie de manière structurée pour des véhicules à deux sources d'énergie, a été proposée Chapitre II. La méthode est appliquée par la suite à un véhicule de plus de trois sources. Une gestion d'énergie par décomposition en sources équivalentes est également proposée.

La description du système est donnée dans la première partie. La commande « locale » du système est ensuite détaillée. La troisième partie concerne la réalisation de la stratégie de gestion d'énergie. L'application des principes à des véhicules de plus de trois sources est proposée dans la dernière partie.

## Plan du chapitre

III.1	Cas du véhicule PàC-batterie-SCs .....	- 70 -
III.1.1	Architecture du système	- 70 -
III.1.2	Dimensionnement des éléments	- 71 -
III.1.3	Organisation de la commande du véhicule étudié	- 71 -
III.2	Stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation .....	- 75 -
III.2.1	Formulation du problème d'optimisation à partir de la REM	- 75 -
III.2.2	Résolution du problème d'optimisation	- 79 -
III.2.3	Résultats de simulations	- 81 -
III.3	Gestion d'énergie par décomposition .....	- 84 -
III.3.1	Principe général	- 84 -
III.3.2	Organisation de la commande du système	- 85 -
III.3.3	Stratégie de gestion d'énergie	- 87 -
III.3.4	Comparaison avec l'approche globale	- 89 -
III.4	Application à des véhicules de plus de 3 sources .....	- 91 -
III.4.1	Véhicule hybride série à quatre sources	- 92 -
III.4.2	Vers les véhicules à N sources	- 100 -
III.5	Conclusion du chapitre.....	- 107 -

### III.1 Cas du véhicule PàC-batterie-SCs

#### III.1.1 Architecture du système

Le véhicule de référence est celui présenté Chapitre II, la Tazzari Zéro. Dans cette étude, le système de propulsion est conservé. Cependant, le véhicule est considéré comme étant un véhicule PàC auquel un banc de SCs et une batterie sont ajoutés (Figure II-1). L'objectif de l'association des sources est de réduire la consommation de dihydrogène ( $H_2$ ) du véhicule par l'ajout de la batterie et des SCs. Cependant, l'inconvénient majeur d'une batterie est sa durée de vie (cf. § I.3). Le cahier des charges des différentes sources est présenté Tableau III-1. Le véhicule ne peut pas effectuer de trajet complet sans le système PàC. Le système PàC est par conséquent une source principale. La batterie et les SCs sont des sources secondaires de par leur utilisation en tant qu'aide à la PàC. L'association du système PàC, de la batterie et des SCs constitue le système d'alimentation en énergie du véhicule.

Tableau III-1 : cahier des charges des différentes sources

<b>Source</b>	<b>Cahier des charges</b>	<b>Priorité</b>
<b>Système PàC</b>	Assurer l'autonomie du véhicule	Source principale
<b>Batterie</b>	1) Diminuer la consommation de $H_2$ 2) Augmenter la durée de vie de la PàC	Source secondaire
<b>SCs</b>	1) Augmenter la durée de vie de la batterie 2) Augmenter la durée de vie de la PàC 3) Diminuer la consommation de $H_2$	Source secondaire

En ce qui concerne l'architecture de l'association des sources du système d'alimentation, chaque source est interfacée par un convertisseur DC-DC (Figure II-2). Cela permet, entre autres, de découpler la tension du bus DC de celle des sources [Amjadi 2010]. D'autres architectures ont également été utilisées dans la littérature, par exemple avec la batterie directement connectée au bus DC [Solano-Martinez 2011], [Li 2012], encore l'utilisation de deux bus DC [Zandi 2011], ou encore l'utilisation de convertisseurs modulaires [Phattanasak 2015]. Le système de propulsion du véhicule ainsi que la route sont considérés comme une source de courant contrôlée (cf. Chapitre III).

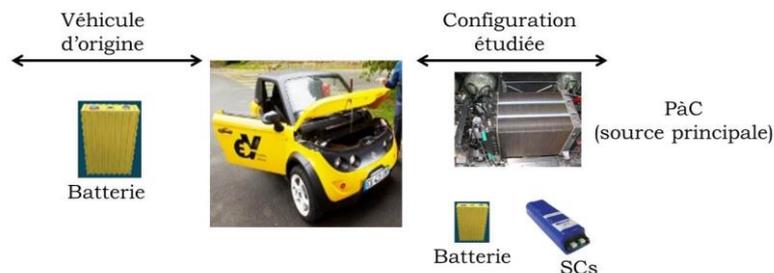


Figure III-1 : véhicule étudié

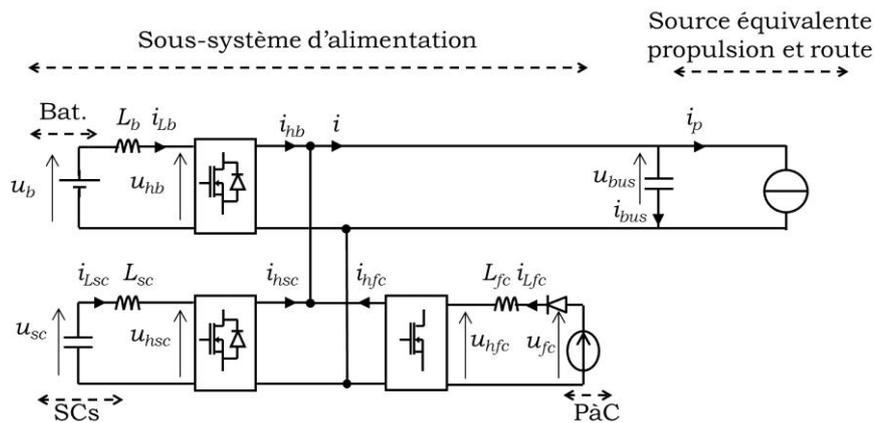


Figure III-2 : architecture du VE PàC/batterie/SCs

### III.1.2 Dimensionnement des éléments

Le système PàC utilisé dans le cas du véhicule PàC-SCs (cf. § II.4) est conservé. Il est par conséquent nécessaire de dimensionner la batterie et le banc de SCs.

Les convertisseurs DC-DC et les bobines de lissage sont identiques à ceux utilisés pour le véhicule PàC-SCs étudié dans le chapitre II. L'hypothèse est faite que la puissance maximale imposée est identique dans chaque branche. Cela veut dire que chaque source du système d'alimentation est susceptible de fournir la puissance maximale appelée par le système de propulsion à un moment du cycle de conduite. A noter que la PàC nécessite l'utilisation d'un convertisseur DC-DC avec un quadrant de fonctionnement contrairement aux autres sources (bidirectionnels en courant).

La batterie et les SCs sont dimensionnés par rapport à des critères de puissance et d'énergie. Des critères de masse et de volume sont également pris en compte pour la faisabilité de l'implantation des éléments dans le véhicule. La procédure de dimensionnement de la batterie et des SCs est détaillée en Annexe H. Le véhicule comporte 24 cellules de batterie (3,3 V / 20 Ah / 820 W) agencées en 2 branches (en parallèle) de 12 cellules en série. Il y a 39 modules de SCs (15 V / 58 F / 1500 W) agencés en 13 branches (en parallèle) de 3 modules en série.

### III.1.3 Organisation de la commande du véhicule étudié

Cette partie concerne la réalisation de la structure de commande du véhicule par l'intermédiaire de la REM.

#### III.1.3.1 Modélisation et Représentation Energétique Macroscopique

##### Modélisation des éléments

Les modèles des sources d'énergie utilisés dans le chapitre précédent sont conservés (cf. § II.2 et II.4). La batterie est ainsi modélisée par sa tension à vide (OCV) et l'impédance

du CPE, les SCs par un modèle de Zubieta et Bonert à deux branches et le stack de la PàC par un modèle quasi-statique (courbe de polarisation avec constante de temps). A noter que les cellules de batterie choisies (20 Ah) sont différentes<sup>1</sup> de celles d'origine (160 Ah) du véhicule mais le type de modèle reste le même. Les paramètres ont changé. Le modèle est issu de la base de données du LTE-IFSTTAR (caractérisé expérimentalement).

Les bobines de lissages et les convertisseurs DC-DC sont modélisés comme dans le chapitre précédent (§ II.2). Ils sont respectivement modélisés par un circuit R-L série et un modèle aux valeurs moyennes. Le bus DC est modélisé par une capacité parfaite (cf. § II.4)

Le nœud de courant entre la branche de la PàC, celle de la batterie, celle des SCs ainsi et le bus DC est exprimée par l'intermédiaire des lois de Kirchhoff :

$$i = i_{hfc} + i_{hb} + i_{hsc} \quad (III-1)$$

### Représentation Energétique Macroscopique du système

La REM du système est présentée Figure III-3. Elle est constituée de quatre sources, la PàC (source de tension), la batterie (source de tension), le banc de SCs (source de tension) et le système de propulsion (source de courant).

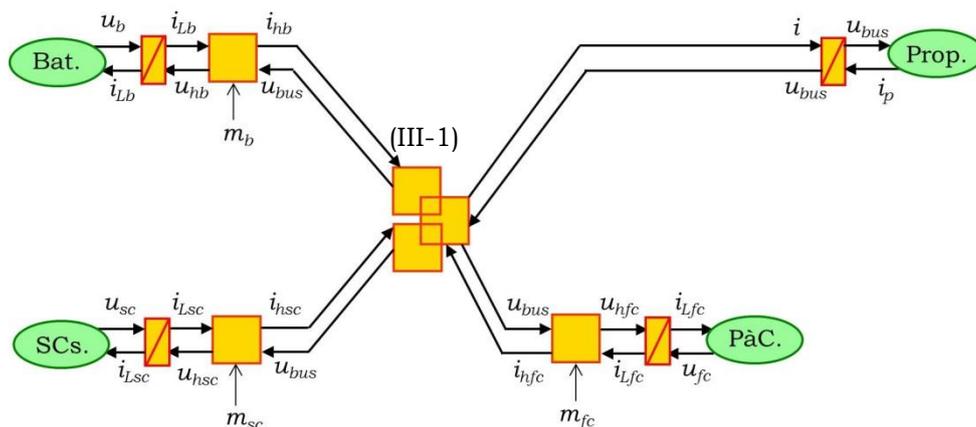


Figure III-3 : REM du système

#### III.1.3.2 Structure de commande par inversion

##### Objectif global et objectifs internes

La structure de commande de véhicules multi-sources ( $\geq 3$ ) à partir de la REM a été étudiée dans plusieurs travaux [Solano-Martinez 2011], [Gauchia Babé 2011]. La structure de commande du système d'alimentation (association du système PàC, de la batterie et des SCs) consiste à assurer l'objectif global de l'association des sources (à l'échelle du véhicule). L'objectif global du système d'alimentation est de fournir la puissance appelée par le système de propulsion. Cela consiste à assurer le maintien de la tension du bus continu  $u_{bus}$  car le courant du système de propulsion  $i_p$  est imposé par le cycle. La stratégie de gestion

<sup>1</sup> La batterie ne doit pas assurer l'autonomie du véhicule, c'est une source secondaire

d'énergie consiste à assurer les objectifs internes (à l'échelle du système d'alimentation) des sources. Elle permet par conséquent la répartition des flux d'énergie entre le système PaC, la batterie et les SCs.

### Structure de commande

La structure de commande correspondant à l'objectif global des sources du système d'alimentation en énergie (asservissement du bus DC), est présentée Figure III-6. Les variables de commandes correspondent aux sorties de la stratégie de gestion d'énergie. En ce qui concerne l'inversion de l'élément de couplage, il faut définir 3 sorties,  $i_{hb-ref}$ ,  $i_{hsc-ref}$ ,  $i_{hfc-ref}$  à partir d'une entrée  $i_{ref}$ . Deux autres entrées de répartition doivent être par conséquent définies. Elles correspondent aux variables de commandes imposées par la stratégie de gestion d'énergie.

### Possibilités de variables de commande

Deux types de possibilités de variables de commandes peuvent être envisageables. En prenant le cas d'un élément de couplage entre deux sources (Figure III-4), les deux possibilités s'expriment de la manière suivante :

- 1) *Critère de répartition* : le premier type de possibilité consiste à définir un critère de répartition  $k_R$  de l'entrée de référence du couplage  $x_{3-ref}$  entre les sorties de références  $x_{1-ref}$  et  $x_{2-ref}$ . La relation correspondante s'exprime par (III-2).

$$\begin{cases} x_{1-ref} = k_R x_{3-ref} \\ x_{2-ref} = (1 - k_R) x_{3-ref} \end{cases} \text{ avec } k_R \in [0,1] \quad (\text{III-2})$$

- 2) *Grandeurs de référence* : le deuxième type de possibilité consiste à imposer l'une des deux sorties de référence ( $x_{1-ref}$  ou  $x_{2-ref}$ ) en tant que variable de commande. Si le choix se porte sur  $x_{1-ref}$  comme variable de commande, cela s'exprime par la relation (III-3).

$$\begin{cases} x_{1-ref} = x_{1-ref} \\ x_{2-ref} = x_{3-ref} - x_{1-ref} \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

Le premier type de possibilités (critère de répartition) est restrictif. Certains modes de fonctionnement ne peuvent pas être réalisés. Si l'entrée de référence  $x_{3-ref}$  est nulle, les sorties de références ( $x_{1-ref}$  et  $x_{2-ref}$ ) sont nulles. Par exemple, dans le cas d'un véhicule à deux sources, la recharge d'une des sources à l'arrêt du véhicule ne pourrait pas se réaliser avec cette possibilité. Le second type de possibilités permet de s'affranchir de ce problème mais nécessite de faire un choix entre  $x_{1-ref}$  et  $x_{2-ref}$ . En résumé le choix d'un critère de répartition permet de définir la variable de commande de manière systématique mais ne permet pas de réaliser tous les modes de fonctionnement du système. Le second type de possibilités est plus général mais nécessite de faire un choix entre les différentes possibilités envisageables. Le choix entre ces deux types de possibilités dépend de contraintes liées au système et/ou

imposées par le concepteur. Par exemple, dans le cas d'un système d'alimentation composé de générateurs non-réversibles, il n'y aura pas de possibilités de flux d'énergie internes entre les sources. Les critères de répartition seront intéressants dans ce cas (Figure III-5). Dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs étudié, le choix est fait d'utiliser le second type de possibilités (courants  $i_{hb-ref}$ ,  $i_{hsc-ref}$  et  $i_{hfc-ref}$ ). Il y a trois combinaisons de deux courants de référence possibles. Les choix envisageables sont présentés Tableau III-2. La structure de commande du système est donnée Figure III-6.

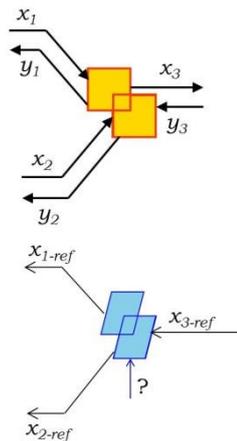


Figure III-4 : problématique du choix de la variable de commande (deux sources)

Tableau III-2 : possibilités de choix dans la structure de commande

	<b>Objectif(s) interne(s) (variables de commande)</b>	<b>Objectif global</b>
<b>Possibilités</b>	$i_{hb-ref} / i_{hfc-ref}$	$i_{hsc-ref}$
	$i_{hb-ref} / i_{hsc-ref}$	$i_{hfc-ref}$
	$i_{hfc-ref} / i_{hsc-ref}$	$i_{hb-ref}$

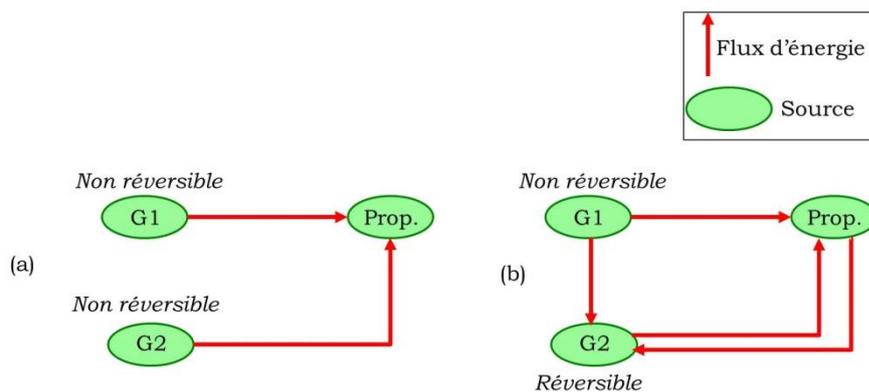


Figure III-5 : choix, (a) critères de répartition, (b) grandeurs de références associées

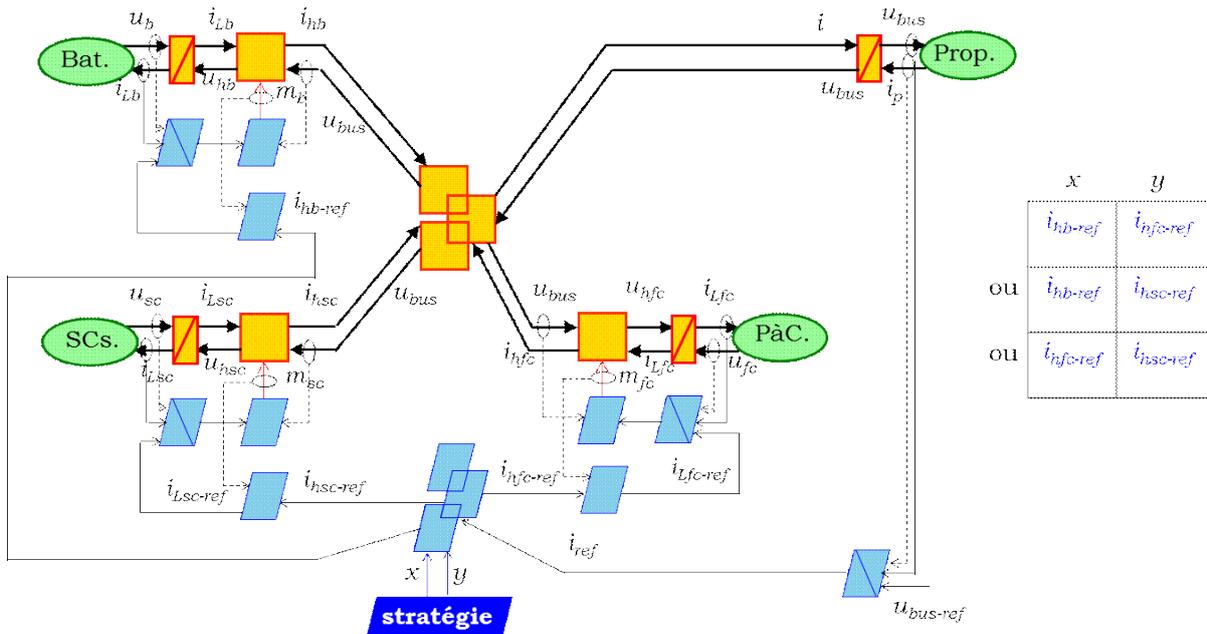


Figure III-6 : REM et structure de commande du véhicule avec les potentielles variables de commande

## III.2 Stratégie de gestion d'énergie basée sur l'optimisation

La stratégie de gestion d'énergie, développée ici, est basée sur la commande optimale. La première partie traite de l'étape de formulation du problème d'optimisation. La seconde partie est dédiée à l'étape de résolution du problème de commande optimale. Des résultats de simulation sont donnés dans la dernière partie.

### III.2.1 Formulation du problème d'optimisation à partir de la REM

La méthode de formulation de problèmes de commande optimale, développée dans le cadre de sous-systèmes d'alimentation à deux sources (cf. § II.3), est utilisée dans le cadre du véhicule PàC-batterie-SCs.

#### III.2.1.1 Choix du critère de performances

L'objectif de l'association multi-source est de réduire la consommation de dihydrogène du véhicule tout en favorisant la durée de vie de la batterie. La durée de vie de la batterie est liée à la valeur efficace du courant  $i_{Lb}$  qui lui est imposé. Le critère de performance  $J_4$  s'exprime par (III-4) avec  $Q_m$  le débit massique de  $H_2$  consommé et  $A_b$  un coefficient de pondération. Plus ce coefficient est élevé, plus la prise en compte du terme associé est importante. Le coefficient de pondération est relatif à la batterie (source secondaire).

$$J_4 = \int_{t_0}^{t_f} (Q_m + A_b i_{Lb}^2) dt \quad (III-4)$$

### III.2.1.2 Définition des variables du problème et des contraintes associées

Le choix de la paire de variables de commande approprié est fait sur des critères relatifs à celles-ci (cf. Chapitre II).

- a) *Limitations associées aux variables de commande* : il est plus important de limiter les courants de la PàC et de la batterie. En effet, ce sont les sources les plus sensibles aux sollicitations imposées. Il est obligatoire d'imposer une utilisation de la PàC en tant que générateur non-réversible (courant positif en convention générateur). Il est également important de limiter les variations du courant de la PàC afin de limiter les problèmes de déficit de H<sub>2</sub> [Thounthong 2009a]. La paire  $i_{hb-ref} / i_{hfc-ref}$  est la plus approprié par rapport au critère relatif aux limitations des variables de commande.
- b) *Objectif(s) de l'association des sources* : l'objectif de l'association des sources est de réduire la consommation de H<sub>2</sub> du véhicule tout en favorisant la durée de vie de la batterie. Dès lors, la paire de variables de commande la plus approprié par rapport à ce critère est la paire  $i_{hb-ref} / i_{hfc-ref}$ .

La paire de variables de commande retenue est  $i_{hb-ref} - i_{hfc-ref}$  (1<sup>ère</sup> possibilité Figure III-6). L'inversion de la relation (II-5) correspond au couplage permettant de définir le courant de référence  $i_{hsc-ref}$  du convertisseur DC-DC des SCs. Cela est exprimé par (II-6).

$$i_{hsc-ref} = i_{ref} - i_{hfc-ref} - i_{hb-ref} \quad (III-5)$$

Des *limitations*, contraintes de type inégalité, sont imposées à ces variables de commande. Au niveau de la PàC, les limitations du courant  $i_{hfc-ref}$  permettent de s'assurer une utilisation en générateur non-réversible de la PàC et de limiter sa décharge ( $i_{hfc-M}$ ). Cela consiste également à imposer un courant strictement positif à la PàC (décharge en convention générateur). En ce qui concerne la batterie, les limitations du courant  $i_{hb-ref}$  (maximale  $i_{hb-M}$  et minimale  $i_{hb-m}$ ) permettent de prendre en compte le courant maximal admissible en décharge et en charge de la batterie. Ces limitations sont exprimées par les relations (III-6) et (III-7). Par ailleurs, les variations maximales du courant de la PàC sont prises en compte en imposant des limitations sur la dérivée du courant  $i_{hfc-ref}$  par rapport au temps. Cela s'exprime par (III-8) avec  $di_{hfc-M}$  le gradient de courant maximal admissible donné par le constructeur.

$$0 \leq i_{hfc-ref} \leq i_{hfc-M} \quad (III-6)$$

$$i_{hb-m} \leq i_{hb-ref} \leq i_{hb-M} \quad (III-7)$$

$$\left| \frac{d}{dt} i_{hfc-ref} \right| \leq di_{hfc-M} \quad (III-8)$$

Le système d'alimentation multi-source est constitué d'une source principale (système PàC) et de deux sources secondaires (la batterie et les SCs). Les variables d'état pouvant être

contraintes par la stratégie de gestion d'énergie sont par conséquent l'énergie  $E_b$  aux bornes de la batterie et l'énergie  $E_{sc}$  aux bornes du banc de SCs. Cela revient à contraindre l'évolution de l'état de charge  $SoC_b$  de la batterie et la tension  $u_{sc}$  aux bornes des SCs. Des limitations sont imposées dans un premier temps à ces variables. Cela consiste à imposer des bornes maximales ( $SoC_{b-M}$  et  $u_{sc-M}$ ) et minimales ( $SoC_{b-m}$  et  $u_{sc-m}$ ) au SoC de la batterie et à la tension des SCs (relations (III-9) et (III-10)).

$$SoC_{b-m} \leq SoC_b(t) \leq SoC_{b-M} \quad (III-9)$$

$$u_{sc-m} \leq u_{sc}(t) \leq u_{sc-M} \quad (III-10)$$

Une contrainte de « charge sustaining » est imposée sur chaque variable d'état dans un second temps. Elle s'exprime par (III-11) et (III-12) avec  $t_0$  et  $t_f$  respectivement l'instant initial et l'instant final de l'horizon du cycle considéré.

$$SoC_b(t_f) = SoC_b(t_0) \quad (III-11)$$

$$u_{sc}(t_f) = u_{sc}(t_0) \quad (III-12)$$

En ce qui concerne les variables exogènes, elles sont mises en évidence par l'élément de couplage (Figure III-6). La tension de référence  $u_{bus-ref}$  est imposée de manière externe au système d'alimentation multi-source. C'est une variable exogène. Le courant  $i_p$  est imposé de manière externe au bus DC. Celui-ci est également une variable exogène. La synthèse du choix des variables du problème de commande optimale est donnée Tableau II-3.

La REM a permis de définir l'ensemble des possibilités offertes comme variables de commandes potentielles (cf. § II.2.2). Une analyse méthodique de ces possibilités a permis de définir les courants de références des convertisseurs de la PàC et de la batterie ( $i_{hfc-ref}$  et  $i_{hb-ref}$ ) comme variables de commande du problème de commande optimale.

Tableau III-3 : synthèse des variables du problème choisies pour le VE PàC-batterie-SCs

<b>Type de variable</b>	<b>Choix</b>	<b>Contrainte(s) égalité</b>	<b>Limitation(s) (contraintes inégalité)</b>
<b>Variables d'états</b>	Energie de la batterie, $E_b$ Energie des SCs, $E_{sc}$ (déduite d'une analyse)	$SoC_b(t_f) = SoC_b(t_0)$ $u_{sc}(t_f) = u_{sc}(t_0)$	$SoC_{b-m} \leq SoC_b(t) \leq SoC_{b-M}$ $u_{sc-m} \leq u_{sc}(t) \leq u_{sc-M}$
<b>Variables de commande</b>	Courants de références $i_{hfc-ref}$ et $i_{hb-ref}$ (déduite par la REM suivie d'une analyse des possibilités)		$0 \leq i_{hfc-ref} \leq i_{hfc-M}$ $i_{hb-m} \leq i_{hb-ref} \leq i_{hb-M}$ $\left  \frac{d}{dt} i_{hfc-ref} \right  \leq di_{hfc-M}$
<b>Variables exogènes</b>	Courant du système de propulsion, $i_p$ Tension de référence du bus DC, $u_{bus-ref}$ (déduites par la REM)		

### III.2.1.3 Description mathématique du problème

Un modèle réduit du système est réalisé par la réduction de la REM et de la structure de commande de l'ensemble du système (cf. § II.3). Premièrement, les ensembles convertisseurs DC-DC et bobines de lissage avec leurs commandes associées sont réduits. Les relations correspondantes sont traduites par (III-13) et (III-14) avec l'indice « i » correspondant à chaque sources (« fc » pour la PàC, « sc » pour les SCs, « b » pour la batterie).

$$i_{hi-ref} = i_{hi} \quad (III-13)$$

$$u_i i_{Li} = u_i i_{hi} \eta_{gi}^{\gamma_{gi}} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{gi} = -1, i_{Li} > 0 \\ \gamma_{gi} = 1, i_{Li} \leq 0 \end{cases} \quad (III-14)$$

Avec l'hypothèse que les courants de références des convertisseurs DC-DC sont bien contrôlés, l'ensemble bus DC et correcteur associé peut-être également réduit (III-15) et (III-16) avec  $\eta_{bus}$  le rendement du bus DC (pertes dues à la résistance interne).

$$\begin{cases} u_{bus} = u_{bus-ref} \\ u_{bus} i = u_{bus} i_p \eta_{bus}^{\gamma_{bus}} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{bus} = -1, i_p > 0 \\ \gamma_{bus} = 1, i_p \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (III-15)$$

$$\begin{cases} i = i_{-ref} \\ i_{-ref} = i_p \eta_{bus}^{\gamma_{bus}} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{bus} = -1, i_p > 0 \\ \gamma_{bus} = 1, i_p \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (III-16)$$

Par ailleurs, le modèle réduit de la batterie utilisé dans le chapitre précédent (cf. § II.3) est conservé. La REM et la structure de commande du modèle réduit du système sont présentées Figure III-7. La seconde étape de la description mathématique du problème consiste à exprimer le critère de performances en fonction des variables de commande identifiées lors de la définition des variables du problème de commande optimale (Tableau II-3). Le débit massique  $Q_m$  de  $H_2$  est défini en fonction de la puissance nette  $P_{fc}$  en sortie de la PàC par l'intermédiaire de courbes du constructeur. Une interpolation du second ordre de la courbe liant  $Q_m$  et  $P_{fc}$  est ensuite réalisée afin de traduire le critère de performance de manière analytique (Figure III-8). Le débit  $Q_m$  est exprimé en fonction de la variable de commande  $i_{hfc-ref}$  par la relation (III-17) avec a, b et c les coefficients déterminés par l'interpolation de la courbe liant  $Q_m$  et  $P_{fc}$ . A noter que le critère de performances est exprimé en fonction des variables de commande ( $i_{hb-ref}$  et  $i_{hfc-ref}$ ). Dès lors, le critère de performance  $J_4$  s'exprime par (III-18).

$$\begin{cases} Q_m = a P_{fc}^2 + b P_{fc} + c \\ P_{fc} = \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \end{cases} \quad (III-17)$$

$$J_4 = \int_{t_0}^{t_f} \left( a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c + A_b \left( \frac{u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 \right) dt \quad (III-18)$$

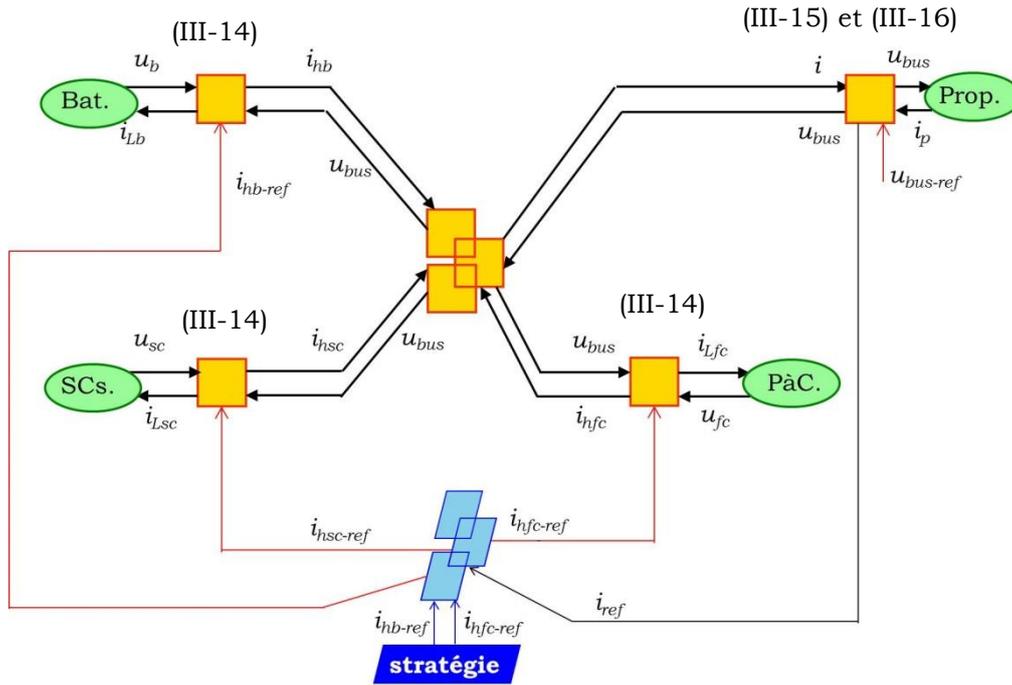


Figure III-7: REM et structure de commande du modèle réduit

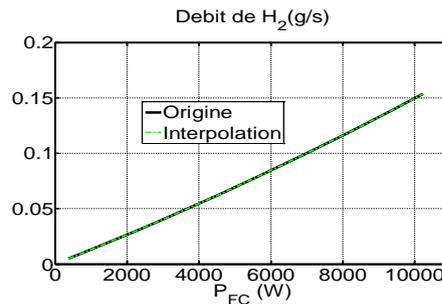


Figure III-8 : évolution du débit de  $H_2$  en fonction de la puissance net de la PàC (courbe constructeur)

### III.2.2 Résolution du problème d'optimisation

La méthode du  $\lambda$ -control est utilisée afin d'assurer le respect des limitations de la tension des SCs et de l'état de charge de la batterie. Le problème de commande optimale comporte deux variables d'états, l'énergie aux bornes de la batterie  $E_b$  ainsi que l'énergie  $E_{sc}$  aux bornes des SCs. Chaque variable d'état est associée à un multiplicateur de Lagrange associé afin de prendre en compte les limitations et les contraintes relatives. Le Hamiltonien  $H_4$  est défini par (III-19) avec  $\lambda_{sc-ref}$  le multiplicateur de Lagrange associé aux SCs et  $\lambda_{b-ref}$  celui associé à la batterie. De plus amples détails sur les calculs effectués sont donnés en Annexe F.

Afin de trouver plus facilement les valeurs initiales des multiplicateurs de Lagrange ( $\lambda_{sc-ref}$  et  $\lambda_{b-ref}$ ), le Hamiltonien est traduit sous forme de somme pondérée de puissance  $H_{4p}$ . Cela permet de trouver des valeurs initiales des multiplicateurs de Lagrange ayant des ordres de grandeurs « restreints » (dizaine...). C'est le principe de la méthode de l'Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) [Paganelli 2001], [Sciarretta 2007], [Guzzella

2013b]. L'ECMS a été utilisé dans des travaux sur un véhicule PàC-batterie-SCs dans [García 2012], avec une formulation différente du problème (variables de commande sous forme de puissances). Une limitation active de la tension des SCs a également été introduite dans ce travail mais d'une manière différente de celle présentée dans le cadre des travaux de cette thèse. Le nouveau Hamiltonien  $H_{4p}$  est déterminé par la relation (III-20) avec  $PCI$  le pouvoir calorifique inférieur du  $H_2$ . A noter que, afin de transformer le terme relatif à la valeur efficace du courant de la batterie en puissance, celui-ci est multiplié par la résistance série de la batterie  $r_b$ . Cela est équivalent à minimiser les pertes Joule au sein de la batterie. Par ailleurs, les multiplicateurs de Lagrange sont remplacés par des coefficients de pondérations  $s_{sc-ref}$  et  $s_{b-ref}$  appelés « facteurs d'équivalences » (III-21). Le nouveau coefficient de pondération  $B_b$  du critère de performance relatif à la batterie est défini par (III-21).

$$\begin{aligned}
 H_4 & \left( E_b(t), E_{sc}(t), i_{hfc-ref}(t), i_{hb-ref}(t), \lambda_{b-ref}(t), \lambda_{sc-ref}(t) \right) \\
 & = a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c \\
 & + A_b \left( \frac{u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 + \lambda_{sc-ref}(t) \frac{dE_{sc}}{dt} + \lambda_{b-ref}(t) \frac{dE_b}{dt}
 \end{aligned} \tag{III-19}$$

$$\begin{aligned}
 H_{4p} = PCI & \left[ a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c \right] + B_b r_b \left( \frac{u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 \\
 & + s_{sc-ref} \frac{dE_{sc}}{dt} + s_{b-ref} \frac{dE_b}{dt}
 \end{aligned} \tag{III-20}$$

Avec

$$\begin{cases}
 B_b = \frac{A_b PCI}{R_b} \\
 s_{sc-ref} = \lambda_{sc-ref} PCI \\
 s_{b-ref} = \lambda_{b-ref} PCI
 \end{cases} \tag{III-21}$$

Les valeurs optimales des courants de références  $i_{hfc-ref}$  et  $i_{hb-ref}$  sont définis par les relations (III-22) et (III-23) en exprimant les conditions nécessaires d'optimalité sur  $H_{4p}$  (cf. Annexe F).

$$i_{hfc-ref}^* = - \frac{\eta_{gfc}^2 \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} \lambda_{sc-ref} + \eta_{gfc} b PCI}{2a PCI u_{bus}} \tag{III-22}$$

$$i_{hb-ref}^* = \frac{\left( \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} \lambda_{b-ref} - \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} \lambda_{sc-ref} \right) u_b^2}{2B_b \eta_{gb}^{2\gamma_{gb}} r_b u_{bus}} \tag{III-23}$$

L'évolution de  $H_{4p}$  est illustrée pour un point de fonctionnement Figure III-9.

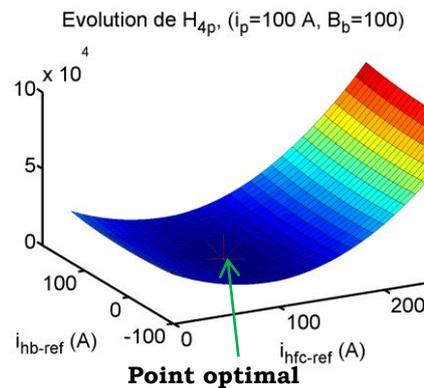


Figure III-9: Illustration de l'évolution du nouveau Hamiltonien pour un point de fonctionnement

### III.2.3 Résultats de simulations

#### III.2.3.1 Détermination des valeurs initiales des facteurs d'équivalences

Une des difficultés supplémentaires par rapport aux véhicules à deux sources est la présence de deux facteurs d'équivalences. Il est par conséquent nécessaire de trouver une méthode permettant de déterminer les valeurs initiales de ces deux facteurs d'équivalences dans le cas du  $\lambda$ -control. L'idée est de fixer en premier lieu un ratio  $q_s$  entre les deux facteurs d'équivalence  $s_{b-ref}$  et  $s_{sc-ref}$ . Le principe consiste à déterminer itérativement un des deux facteurs d'équivalences puis, de déterminer le ratio  $q_s$  entre les deux facteurs d'équivalences [Vinot 2013]. Dans cette thèse, le choix est fait de déterminer le facteur d'équivalence correspondant à la source susceptible de subir le plus de limitations. En effet, la valeur initiale du facteur d'équivalence sera directement liée aux limitations de la source associée. Le choix se porte donc vers les SCs. La valeur initiale  $s_{sc-ref0}$  de  $s_{sc-ref}$  permettant de respecter la contrainte (II-16) est déterminée au préalable à partir d'une valeur du coefficient  $B_b$  fixée initialement. Par la suite, le ratio  $q_s$  entre  $s_{sc-ref0}$  et la valeur initiale  $s_{b-ref0}$  de  $s_{b-ref}$  est déterminé afin de respecter la contrainte (III-11). La procédure est synthétisée Figure III-10.

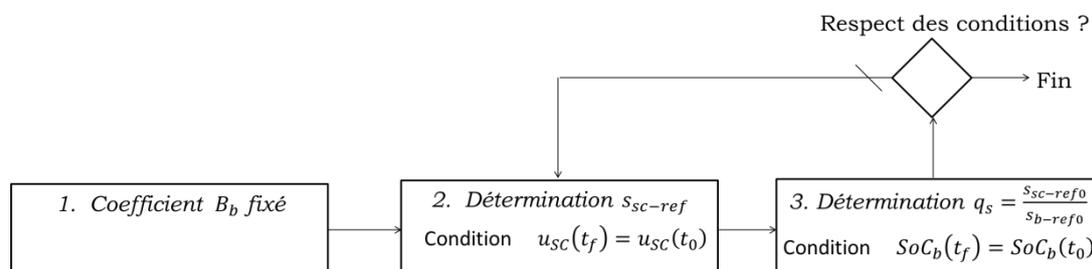


Figure III-10: Détermination des valeurs initiales des facteurs d'équivalences

### III.2.3.2 Paramètres

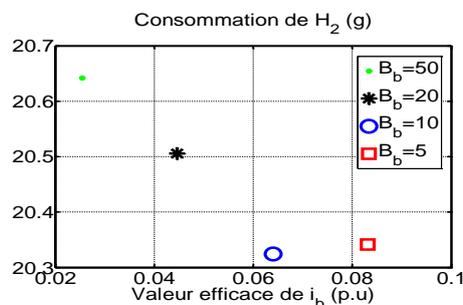
Les simulations sont réalisées sur la phase basse vitesse d'un cycle WLTC classe 2 (cf § II.3). Le véhicule comporte deux passagers ayant une masse globale de 120 kg. Les paramètres des simulations (modèles et stratégie) sont donnés Tableau II-4. A noter que les simulations sont effectuées sur les modèles dynamiques (complet) des véhicules.

Tableau III-4: paramètres des simulations

Eléments	Paramètres
Batterie (masse 12,8 kg)	$u_{b-nom}=12 \times 3,3 \text{ V}$   $E_{b-nom}=24 \times 6,6 \text{ Wh}$   $r_b \in \frac{12}{2} \times [8,2; 9,5] \text{ m}\Omega$ $OCV \in 12 \times [2,8; 3,4] \text{ V}$   $i_{b-M} = 2 \times 200 \text{ A}$   $i_{b-m} = -2 \times 100 \text{ A}$ $SoC_{b0} = 95 \%$   $SoC_{b-M} = 100 \%$   $SoC_{b-m} = 90 \%$
SCs (masse 19,5 kg)	$C_{1sc-nom} = 251 \text{ F}$   $u_{sc-M} = 45 \text{ V}$   $u_{sc-m} = 0.65 u_{sc-M}$   $u_{sc0} = 0.9 u_{sc-M}$ $i_{sc-M} = 13 \times 380 \text{ A}$   $i_{sc-m} = 13 \times -380 \text{ A}$
Per unit	<i>Idem Chapitre II</i>

### III.2.3.3 Résultats de simulations

Les simulations consistent à évaluer l'apport de l'association des différentes sources et de la stratégie de gestion d'énergie par rapport au véhicule avec le système PàC seul. La valeur du coefficient de pondération  $B_b$  impacte les résultats. L'ensemble des compromis possibles (réduction de la consommation de  $H_2$ -minimisation de la valeur efficace du courant de la batterie) peut être représenté par un front de Pareto [Torokhti 1985], [Vinot 2013]. Des résultats obtenus pour différentes valeurs de  $B_b$  sont représentés Figure III-11. Les résultats développés par la suite sont relatifs à une valeur de coefficient  $B_b$  égale à 10. Celle-ci représente un bon compromis entre la réduction de la consommation de  $H_2$  et la minimisation de la valeur efficace du courant de la batterie. Les valeurs initiales des facteurs d'équivalence ont été déterminées égales à -1,624 et -1,6211 pour  $S_{b-ref}$  et  $S_{sc-ref}$  respectivement. Le courant de la PàC dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs (Figure III-12.a) est lissé par rapport au cas du véhicule avec système PàC seul. En ce qui concerne l'évolution des courants au niveau des sources secondaires, il apparaît que le banc de SCs tend à absorber les pics de courants par comparaison à la batterie (Figure III-12.b). Les limitations et contraintes liées à la batterie (Figure III-13.a) et aux SCs (Figure III-13.b) sont respectées.

Figure III-11 : résultats obtenus pour plusieurs valeurs de  $B_b$

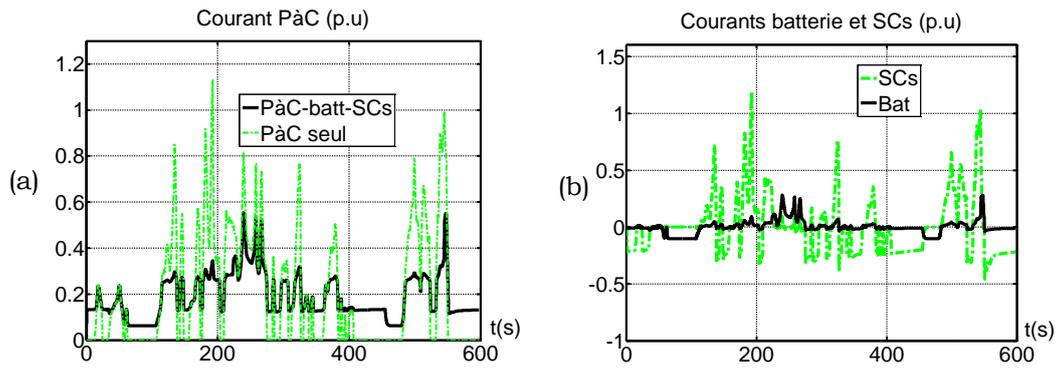


Figure III-12 :  $B_b=10$ , (a) courants de la PàC, (b) courants de la batterie et des SCs

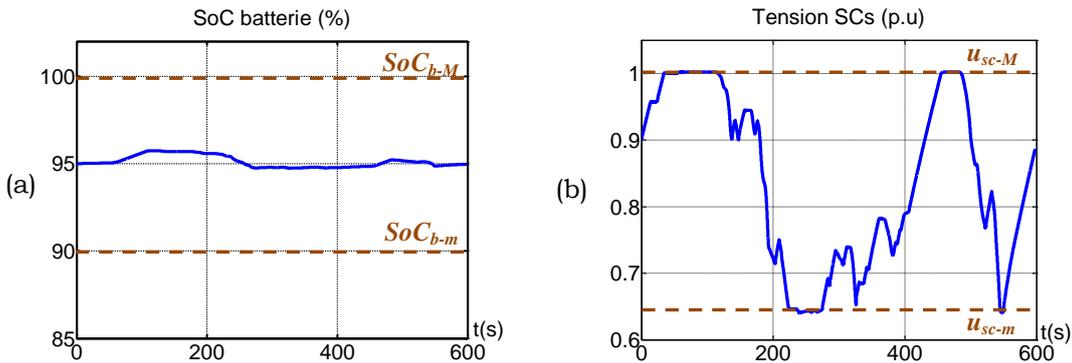


Figure III-13 :  $B_b=10$ , (a) état de charge de la batterie, (b) tension des SCs

Afin d'évaluer l'apport des SCs sur la durée de vie de la batterie, un véhicule PàC-batterie a également été simulé (cf. Tableau III-5). Le véhicule PàC-batterie comporte la même batterie que le véhicule PàC-batterie-SCs. Le  $\lambda$ -control est utilisé comme stratégie de gestion d'énergie pour le véhicule PàC-batterie. Le critère de performances utilisé est la diminution de la consommation de  $H_2$ . Les SCs permettent une réduction importante de la valeur efficace du courant de la batterie dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs par rapport au véhicule PàC-batterie. Cette réduction est influencée par la valeur du coefficient de pondération  $B_b$ . Elle est de 77 % pour  $B_b$  égal à 10 et de 83 % pour  $B_b$  égal à 20. En ce qui concerne la consommation de  $H_2$  du véhicule PàC-batterie-SCs, elle est réduite de 7 % par rapport au véhicule avec le système PàC seul (cf. Tableau III-6). Cette réduction est négligeable par rapport au véhicule PàC-batterie. La valeur efficace du courant de la PàC est considérablement réduite dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs par rapport au véhicule avec le système PàC seul.

Tableau III-5 : tableau comparatif des véhicules PàC-batterie et PàC-batterie-SCs

Véhicule	PàC-batterie-SCs $B_b=10$ (masse 640 kg)	PàC-batterie-SCs $B_b=20$ (masse 640 kg)
<b>PàC-batterie</b> (masse 617 kg)	Consommation de $H_2$ :- 0,3 %	Consommation de $H_2$ :+ 0,5 %
	Valeur efficace de $i_{fc}$ :+ 7 %	Valeur efficace de $i_{fc}$ :+ 12 %
	Valeur efficace de $i_b$ : -77 %	Valeur efficace de $i_b$ : - 83 %

Tableau III-6 : tableau comparatif des véhicules avec système PàC seul et PàC-batterie-SCs

Véhicule	PàC-batterie-SCs $B_b=10$ (masse 640 kg)	PàC-batterie-SCs $B_b=20$
<b>PàC seul (masse 600 kg)</b>	Consommation de $H_2$ : - 7 %	Consommation de $H_2$ : - 6 %
	Valeur efficace de $i_{fc}$ : - 33 %	Valeur efficace de $i_{fc}$ : - 29 %

La stratégie développée permet d'assurer les objectifs fixés. En effet, les résultats des simulations montrent que l'association de la PàC avec la batterie et les SCs permet de diminuer la consommation de  $H_2$  du véhicule. De plus, les SCs permettent de réduire les sollicitations de la batterie. En d'autres termes, les SCs assistent la batterie qui assiste la PàC. Par ailleurs, la synthèse de la stratégie a été réalisée par l'intermédiaire de la méthode présentée Chapitre II. Cette méthode a permis de définir de manière claire les différentes grandeurs à utiliser pour la synthèse de la stratégie, notamment les variables de commandes. D'autre part, la synthèse de la stratégie a été réalisée par l'intermédiaire d'un modèle réduit du système qui a été déduit par la simplification de la REM et de la structure de commande du modèle complet. Bien que la méthode s'avère efficace pour la formulation du problème de commande optimale, certains aspects restent loin d'être systématiques. En effet, la détermination du coefficient de pondération  $B_b$  n'est pas chose aisée mais fait partie de la formulation du problème. Cela complexifie la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie.

### III.3 Gestion d'énergie par décomposition

#### III.3.1 Principe général

L'association PàC-batterie-SCs a été étudiée de manière globale dans la partie précédente. Dans la partie qui suit, l'idée est de regrouper certaines sources en sous-ensembles afin de faciliter la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie. Cette idée a été utilisée dans la littérature pour des systèmes PàC-batterie-SCs [Yu 2011] et Système MCI-batterie-SCs [Santucci 2014], [Ko 2015] mais sans donner de méthode pour la définition des différents sous-ensembles. Des propositions de règles sont données dans ce mémoire afin d'effectuer les regroupements. Ce sont les objectifs internes des sources qui vont permettre de mettre en évidence les regroupements possibles (cf. § I.3). Ces objectifs sont énoncés Tableau III-7. Les objectifs internes sont les objectifs des sources vis-à-vis de leur association. Les regroupements des sources peuvent s'effectuer si les sources à regrouper ont des objectifs internes communs. La batterie et les SCs ont des objectifs internes communs. Ces deux sources sont regroupées dans une source équivalente (avec leur commande associée) (Figure III-14). A noter que le système PàC étant une source principale, il ne peut pas avoir d'objectifs internes envers les autres sources.

Tableau III-7 : objectifs internes des différentes sources

Source	Objectif(s) interne(s)
PàC	-
SCs	Limiter les sollicitations de la batterie et de la PàC
Batterie	Limiter les sollicitations de la PàC

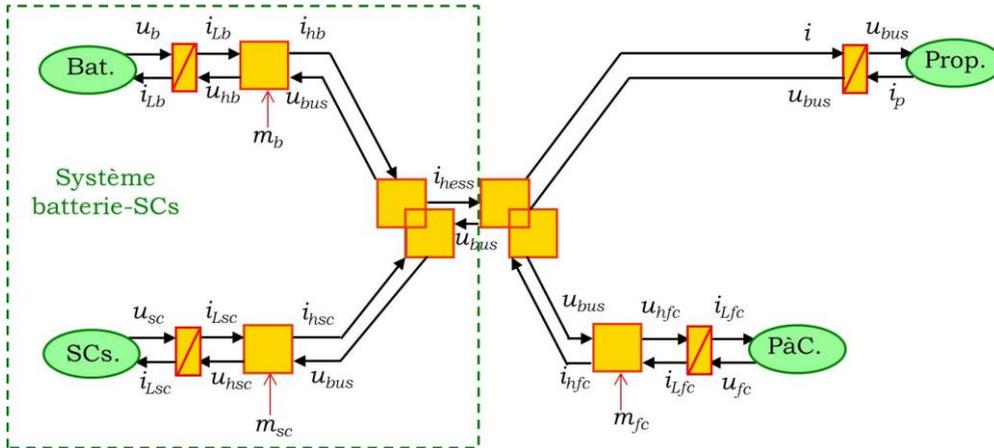


Figure III-14: mise en évidence des regroupements

L'élément de couplage est décomposé afin de distinguer le système batterie-SCs du reste du système d'alimentation. Le courant  $i_{hess}$  imposé au système batterie-SCs est défini par la relation (III-24).

$$i_{hess} = i_{hsc} + i_{hb} \quad (III-24)$$

### III.3.2 Organisation de la commande du système

La commande du système est organisée en deux niveaux : commande du système batterie-SCs, commande du système global.

#### III.3.2.1 Commande du système batterie-SCs

La structure de commande du système batterie-SCs consiste à assurer l'objectif global des sources qui est d'assurer la puissance qui leur est imposée. La stratégie du système batterie-SCs consiste à assurer le partage des flux d'énergie entre la batterie et les SCs (objectif interne à l'échelle de la source équivalente). La REM ainsi que la structure de commande correspondante sont présentées Figure III-15. Cela correspond à la commande du système batterie-SCs présentée dans le § II.4. Par la suite, l'ensemble batterie-SCs et la commande associée seront regroupés dans une source de courant équivalente contrôlée.

#### III.3.2.1 Commande du système global

Le système batterie-SCs et sa commande associée sont remplacés par une source de courant contrôlée. La structure de commande du système global consiste à assurer le

maintien de la tension du bus DC à la valeur désirée (objectif global). La stratégie de gestion d'énergie consiste à assurer la répartition des flux d'énergie entre le système batterie-SCs et la PàC (objectif interne, contrôle du courant  $i_{hfc}$ ). L'organisation de la commande du système global est présentée Figure III-16. A noter que le bus DC traduisant l'objectif global des sources du système d'alimentation, celui-ci ne peut pas être imbriqué dans une source équivalente.

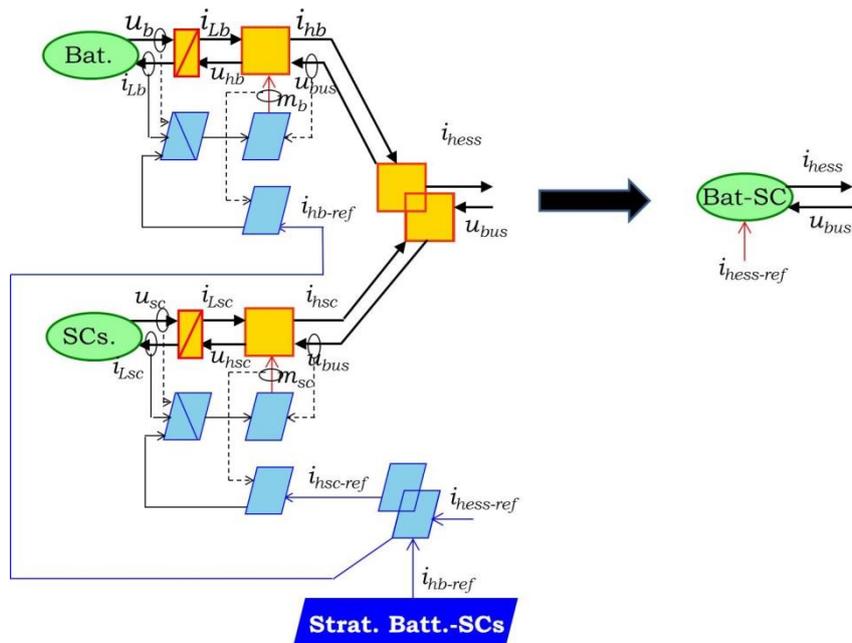


Figure III-15: REM et structure de commande de l'association batterie-SCs

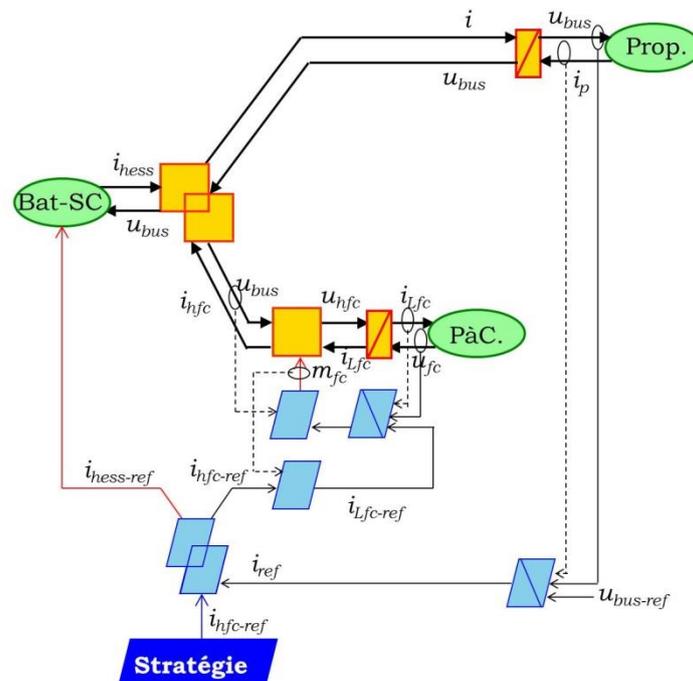


Figure III-16: REM et structure de commande du système global

### III.3.3 Stratégie de gestion d'énergie

#### III.3.3.1 Stratégie du système batterie-SCs

La stratégie du système batterie-SCs a été étudiée dans le chapitre précédent (cf. § II.4). La formulation ainsi que la résolution du problème de commande optimale restent inchangées. L'expression optimale de la variable de commande  $i_{hb-ref}$  s'exprime par conséquent par (III-25) avec  $\lambda_{sse-ref}$  le multiplicateur de Lagrange associé à la source équivalente.

$$i_{hb-ref}^* = \frac{OCV^2 \left( 2\eta_{gb}^{\gamma_{gb}} \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} \lambda_{sse-ref} - R_b \eta_{gsc}^{2\gamma_{gsc}} \lambda_{sse-ref}^2 \right)}{u_{bus} \left( 4R_b^2 \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} \eta_{gsc}^{2\gamma_{gsc}} \lambda_{sse-ref}^2 - 8\eta_{gb}^{2\gamma_{gb}} \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} \lambda_{sse-ref} R_b + 4\eta_{gb}^{2\gamma_{gb}} \right)} \quad (III-25)$$

#### III.3.3.2 Stratégie du système global

Cette étape consiste à déterminer la stratégie de gestion d'énergie du système présenté Figure III-16. La formulation du problème de commande optimale est réalisée par l'intermédiaire de la méthode utilisée depuis le début du manuscrit.

##### **Définition du critère de performance**

L'objectif du système global (point de vue concepteur) est de diminuer la consommation de  $H_2$  du véhicule. Le critère de performance  $J_5$  sera défini par (III-26) avec  $Q_m$  le débit massique de  $H_2$  consommé.

$$J_5 = \int_{t_0}^{t_f} Q_m dt \quad (III-26)$$

##### **Définition des variables du problème de commande optimale**

La variable de commande est le courant de référence  $i_{hfc-ref}$  du convertisseur de la PàC. Des limitations sont imposées à cette variable (cf. § III.2.1.2). Ces limitations sont exprimées par (III-6). La variable d'état associée est l'énergie  $E_{hess}$  du système batterie-SCs. Des limitations sont imposées sur la variable d'état  $E_{hess}$ . Ces limitations s'expriment par (III-27). Une contrainte de « charge sustaining » est également imposée. En effet, le système batterie-SCs est utilisé en tant que « tampon » énergétique. Par conséquent, son bilan énergétique doit être nul entre le début et la fin de l'horizon du cycle de conduite considéré. La contrainte de « charge sustaining » s'exprime par (III-28).

$$E_{hess-m} \leq E_{hess}(t) \leq E_{hess-M} \quad (III-27)$$

$$E_{hess}(t_f) = E_{hess}(t_0) \quad (III-28)$$

Les limitations (III-27) sont imposées de manière à respecter celles qui sont relatives à la batterie (III-9). En effet, les limitations liées à la tension des SCs sont gérées par la

stratégie du système batterie-SCs. Par analogie à l'étude présentée Chapitre II sur le véhicule PàC-SCs avec deux convertisseurs (cf. § II.4), les variables exogènes sont le courant du système de propulsion  $i_p$  ainsi que la tension de référence  $u_{bus-ref}$  du bus DC.

### Description mathématique du problème de commande optimale

En ce qui concerne le modèle réduit du système global, l'ensemble convertisseur DC-DC et bobine de lissage avec sa commande associée est réduit (Figure III-17). Les relations correspondantes sont traduites par (III-13) et (III-14) avec l'indice « i » correspondant à « fc ». De même, le bus DC et son correcteur associé sont réduits comme présenté dans l'étude précédente (cf. § III.2.1.3). Les relations correspondantes sont (III-15) et (III-16).

Le critère de performances doit être exprimé en fonction de la variable de commande  $i_{hfc-ref}$ . Il s'exprime par la relation (III-29). A noter que le système batterie SCs se compose de la REM et de la structure de commande du modèle réduit correspondant.

$$J_5 = \int_{t_0}^{t_f} \left( a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c \right) dt \quad (III-29)$$

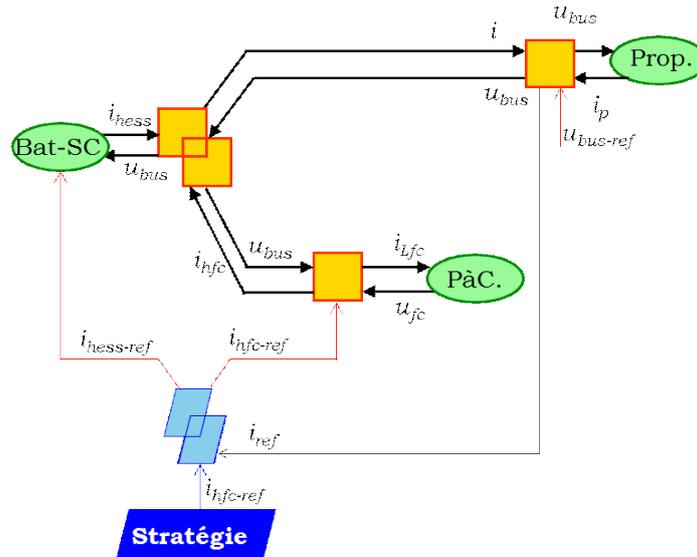


Figure III-17: REM et structure de commande du modèle réduit du système global

### Résolution du problème de commande optimale

La méthode du  $\lambda$ -control est appliquée sur le système global. Le Hamiltonien  $H_5$  est défini par (III-19).

$$\begin{aligned} H_5 & \left( E_{hess}(t), i_{hfc-ref}(t), \lambda_{hess-ref}(t) \right) \\ & = a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c + \lambda_{hess-ref}(t) \frac{dE_{hess}}{dt} \end{aligned} \quad (III-30)$$

Le Hamiltonien est ensuite traduit sous forme de somme pondérée de puissance (ECMS, relation (III-31)).

$$H_{5p} = PCI \left[ a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c \right] + S_{hess-ref} \frac{dE_{hess}}{dt} \quad (III-31)$$

Avec

$$S_{hess-ref} = \lambda_{hess-ref} PCI \quad (III-32)$$

Sur le modèle réduit du système, la puissance  $P_{hess}$  aux bornes du SSE mixte s'exprime par (III-33).

$$\begin{cases} P_{hess} = u_{bus}(i_{-ref} - i_{hfc-ref}) \\ P_{hess} = -\frac{dE_{hess}}{dt} \end{cases} \quad (III-33)$$

La résolution des conditions nécessaires d'optimalité permet de définir l'expression optimale du courant  $i_{hfc-ref}$ :

$$i_{hfc-ref}^* = -\frac{\eta_{gfc}^2 S_{hess-ref} + \eta_{gfc} b PCI}{2a PCI u_{bus}} \quad (III-34)$$

### III.3.4 Comparaison avec l'approche globale

#### Résultats de simulations

Les résultats de simulations sont présentés ci-après. Il est intéressant de remarquer que le courant de la PàC est maintenant constant (Figure III-18.a), ce qui favorise la durée de vie de la PàC. Cela est dû au fait que le courant de la PàC ne dépend plus des variations de la tension des SCs. En effet, celles-ci sont gérées de manière interne par la batterie. Par ailleurs, l'évolution de l'état de charge de la batterie montre que celle-ci est plus utilisée par rapport à l'approche globale (Figure III-19.a). Cependant, le courant qui lui est imposé est lissé par l'intermédiaire des SCs (Figure III-18.b). En ce qui concerne la tension des SCs, les limitations sont assurées (Figure III-19.b). Cependant, la contrainte de « charge sustaining » n'est pas complètement respectée. Cela n'est pas problématique pour la comparaison avec le véhicule avec système PàC seul, car l'essentiel est que la contrainte de « charge sustaining » soit respectée au niveau de l'énergie de la source équivalente batterie-SCs (Figure III-20). Cependant, cela peut créer des problèmes de répétabilité des résultats. Par exemple, l'état de charge de la batterie est susceptible d'atteindre sa limitation basse si le cycle se répète. Le système PàC prendra le relais dans ce cas, et le courant qui lui est imposé ne sera plus constant. A noter que la condition de « charge sustaining » aux bornes de la source équivalente batterie-SCs prend en compte les pertes dans les deux branches (convertisseurs et bobines de lissage).

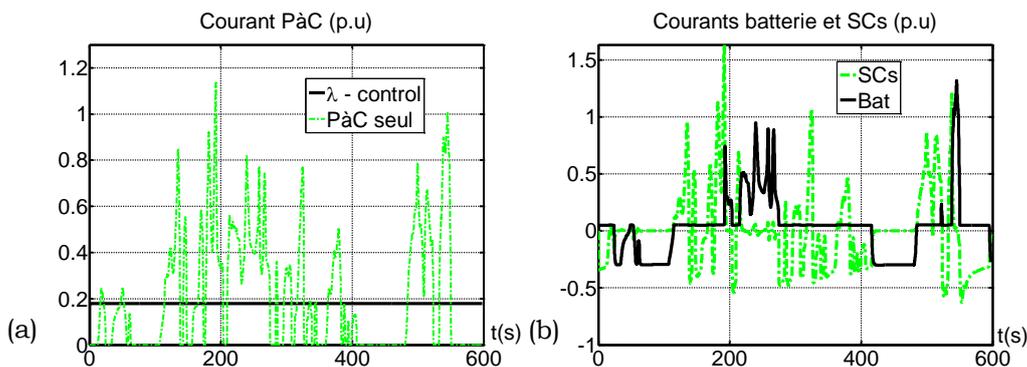


Figure III-18 : décomposition, (a) courant de la PàC, (b) courants de la batterie, des SCs

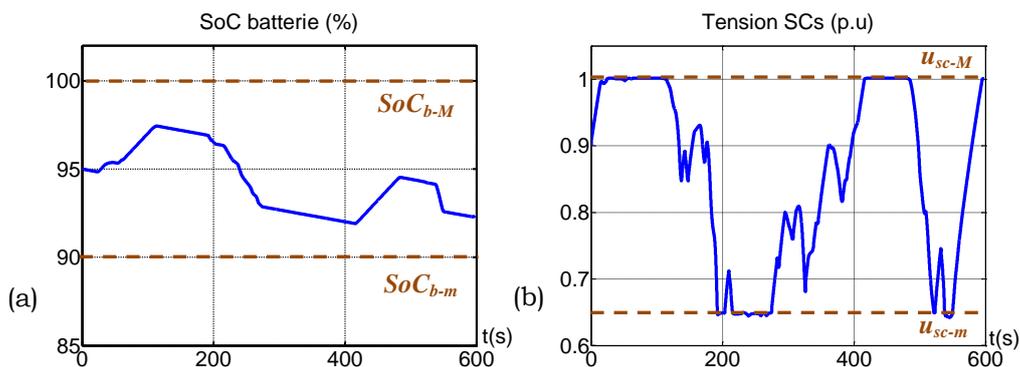


Figure III-19 : décomposition (a) état de charge de la batterie, (b) tension des SCs

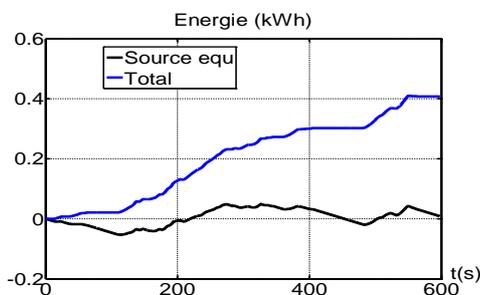


Figure III-20 : décomposition, énergie mise en jeu dans le véhicule et dans le système batterie-SCs (source équivalente)

### Comparaison avec l'approche globale

Des tableaux comparatifs des deux approches sont donnés par rapport au véhicule PàC-batterie (cf. Tableau III-8), et au véhicule avec système PàC seul (cf. Tableau III-9). Le pourcentage de réduction de la consommation de H<sub>2</sub> (par rapport au véhicule avec système PàC seul) est deux fois plus important dans le cas de l'approche décomposée que dans le cas de l'approche globale. Cela est dû au fait que les conditions d'optimalité sont respectées. En effet, le facteur d'équivalence associé au courant de la PàC reste constant. Dans le cas de l'approche globale, le courant de la PàC est associé au facteur d'équivalence relatif à la tension des SCs. Les limitations actives de la tension des SCs conduisent à des variations

du facteur d'équivalence associé ( $\lambda$ -control) et donc à un non-respect des conditions d'optimalités associés. Cependant, la batterie est plus utilisée dans l'approche par décomposition (ou décomposée). Ce qui conduit à une valeur efficace du courant de la batterie considérablement plus élevée que dans le cas de l'approche globale où le facteur de pondération  $B_b$  conditionne l'utilisation de la batterie.

Tableau III-8 : comparaison des deux approches par rapport au véhicule PàC-batterie

<b>Véhicule</b>	<b>PàC-batterie-SCs Approche globale <math>B_b=10</math></b>	<b>PàC-batterie-SCs Approche décomposée</b>
<b>PàC-batterie</b>	Consommation de $H_2$ : - 0,4 %	Consommation de $H_2$ : - 7 %
	Valeur efficace de $i_{fc}$ : + 7 %	Valeur efficace de $i_{fc}$ : -12 %
	Valeur efficace de $i_b$ : - 77 %	Valeur efficace de $i_b$ : - 14 %

Tableau III-9 : comparaison des deux approches par rapport au véhicule PàC seule

<b>Véhicule</b>	<b>PàC-batterie-SCs Approche globale <math>B_b=10</math></b>	<b>PàC-batterie-SCs Approche décomposée</b>
<b>PàC seule</b>	Consommation de $H_2$ : -7 %	Consommation de $H_2$ : -13 %
	Valeur efficace de $i_{fc}$ : -33 %	Valeur efficace de $i_{fc}$ : -45 %

La synthèse de la stratégie a été facilitée par le regroupement de la batterie et des SCs (avec la commande associée) dans une source équivalente. En effet, cela n'a pas été nécessaire de rechercher un coefficient de pondération dans le critère de performances. La différence essentielle entre les résultats des deux approches est que le critère de performance associé à l'association globale (consommation de  $H_2$ ) est favorisé dans l'approche décomposée par rapport au critère de performances associé à la source équivalente (valeur efficace du courant de la batterie). Cependant, bien que la condition de « charge sustaining » soit respectée aux bornes de la source équivalente batterie-SCs, une légère décharge de la batterie est constatée à la fin du cycle, cela peut créer des problèmes de répétabilité des résultats. Par ailleurs, un exemple d'application de la gestion par décomposée à un autre véhicule à trois sources, système MCI-batterie-SCs, est présenté en Annexe I. Le point essentiel ici, est que la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie a été simplifiée par l'utilisation de l'approche décomposée, tout en donnant des résultats satisfaisants. L'approche décomposée sera par conséquent utilisée dans la partie suivante, pour la gestion d'énergie un véhicule à quatre sources.

### III.4 Application à des véhicules de plus de 3 sources

Dans cette partie, les principes utilisés pour la gestion d'énergie d'un véhicule à trois sources, sont étendus dans un premier temps, à un véhicule hybride à quatre sources. Dans un second temps, une méthodologie est proposée pour la gestion d'énergie de véhicules avec un nombre de sources supérieur à quatre.

### III.4.1 Véhicule hybride série à quatre sources

#### III.4.1.1 Architecture du véhicule étudié

Le véhicule étudié est un véhicule de type hybride série, dont l'architecture est présentée Figure III-21. Le système d'alimentation du véhicule est composé de quatre sources, un système MCI (associé à une génératrice électrique), une batterie, un banc de SCs et un système PàC. La différence par rapport au système étudié précédemment (cf. véhicule PàC-batterie-SCs), se situe dans l'ajout du groupe électrogène (association système MCI-génératrice électrique).

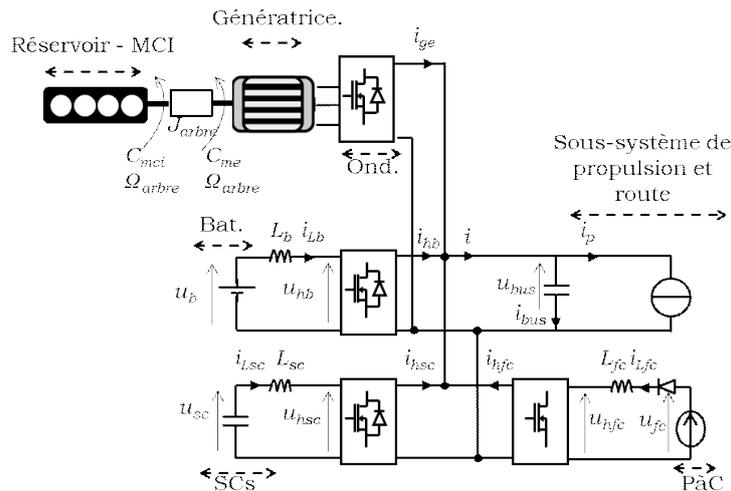


Figure III-21: Architectures du véhicule à 4 sources

#### III.4.1.2 Choix et modélisation des éléments

##### Choix des éléments

L'ajout du groupe électrogène a pour objectif d'augmenter l'autonomie du véhicule. En effet, celui-ci est utilisé en tant que prolongateur d'autonomie. Plusieurs études récentes ont été réalisées sur les véhicules hybrides avec prolongateurs d'autonomie [Imai 2008], [Jensen 2013], [Andreasen 2014], [Chen 2014]. Cela montre l'intérêt actuel pour ce type de système. Les éléments du véhicule PàC-batterie-SCs sont conservés. Par conséquent, le groupe électrogène est choisi de manière à pouvoir être implanté dans le véhicule. Le système MCI ainsi que la génératrice (associée à l'onduleur) sont issus de la bibliothèque de composants ADVISOR [Markel 2002]. Le MCI et la génératrice ont une puissance maximale de 5 kW. L'ensemble du système a une masse de 25 kg. Pour les autres éléments, le lecteur pourra se référer aux caractéristiques données Tableau III-4.

##### Modélisation des éléments

Les modèles des éléments du véhicule PàC-batterie-SCs sont conservés (cf. § III.1). Cette partie traite de la modélisation du groupe électrogène. Le MCI est considéré comme étant une source de couple réglable imposant un couple  $C_{mci}$  à l'arbre. Une constante de temps  $\tau_{mci}$  est introduite afin de prendre en compte la dynamique principale de l'asservissement de

couple [Lhomme 2007], [Boulon 2009]. Cela s'exprime par la relation (III-35). La consommation de carburant est obtenue à partir d'une cartographie représentant l'évolution du débit de carburant en fonction du régime moteur.

$$C_{mci-ref} = C_{mci} + \tau_{mci} \frac{d}{dt} C_{mci} \quad (III-35)$$

L'arbre impose une vitesse angulaire  $\Omega_{arbre}$  au MCI et à la génératrice. Il est régi par la relation (III-36) avec  $J_{arbre}$  le moment d'inertie associé,  $C_{mci}$  le couple du MCI, et  $C_{me}$  le couple de la génératrice électrique.

$$J_{arbre} \frac{d}{dt} \Omega_{arbre} = C_{mci} - C_{me} \quad (III-36)$$

L'ensemble constitué de la génératrice électrique, de son convertisseur, et de la commande relative, est modélisé par l'intermédiaire d'une cartographie dans le plan couple-vitesse, représentant les pertes associées ( $P_{pertes}$ ). Le courant  $i_{ge}$  de la génératrice est déterminée par la relation (III-37) avec  $u_{bus}$  la tension du bus DC.

$$i_{ge} = \frac{C_{me} \Omega_{arbre} - P_{pertes}}{u_{bus}} \quad (III-37)$$

La connexion en parallèle au niveau du bus DC est modélisée par l'intermédiaire des lois de Kirchhoff.

$$\begin{cases} i_{ge} + i_{hb} + i_{hsc} + i_{hfc} - i = 0 \\ u_{bus} \text{ commun} \end{cases} \quad (III-38)$$

### III.4.1.3 REM et organisation de la commande du système

#### **REM du système**

La REM du système global est présentée Figure III-22. Afin de faciliter la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie, des éléments du système seront regroupés dans le but de former des sources équivalentes contrôlées. L'approche a été utilisée dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs et a donné des résultats satisfaisants (cf. § III.3.4).

#### **Regroupement par sous-ensembles**

Le regroupement des sous-ensembles s'effectue par l'intermédiaire des règles suivantes :

- 1) *Regroupement à partir de l'élément de couplage* : c'est l'élément de couplage qui traduit les interactions entre les différentes sources d'énergie. Par conséquent, les différents regroupements doivent se réaliser à partir de celui-ci.
- 2) *Regroupement en fonction des objectifs* : deux situations peuvent être rencontrées dans le cas du véhicule étudié. La première situation concerne les trajets dits « courts ». Dans cette situation, le Groupe Electrogène (GE) ne sera pas utilisé car le système PàC peut assurer l'autonomie du véhicule. La deuxième situation est

relative aux trajets dits « longs », pour lesquels le réservoir de H<sub>2</sub> n'est pas dimensionné. Le GE va alors assister les autres sources du système d'alimentation, afin d'effectuer l'intégralité du trajet (Figure III-23). La situation des trajets « longs » (utilisation du GE) est considérée dans l'étude présentée. Les objectifs des différentes sources sont listés ci-dessous, afin de mettre en évidence les différents regroupements possibles (Tableau III-10). La priorité des différentes sources est également donnée. Le système PàC est la source principale du système d'alimentation du véhicule. Les autres sont des sources de priorité secondaire.

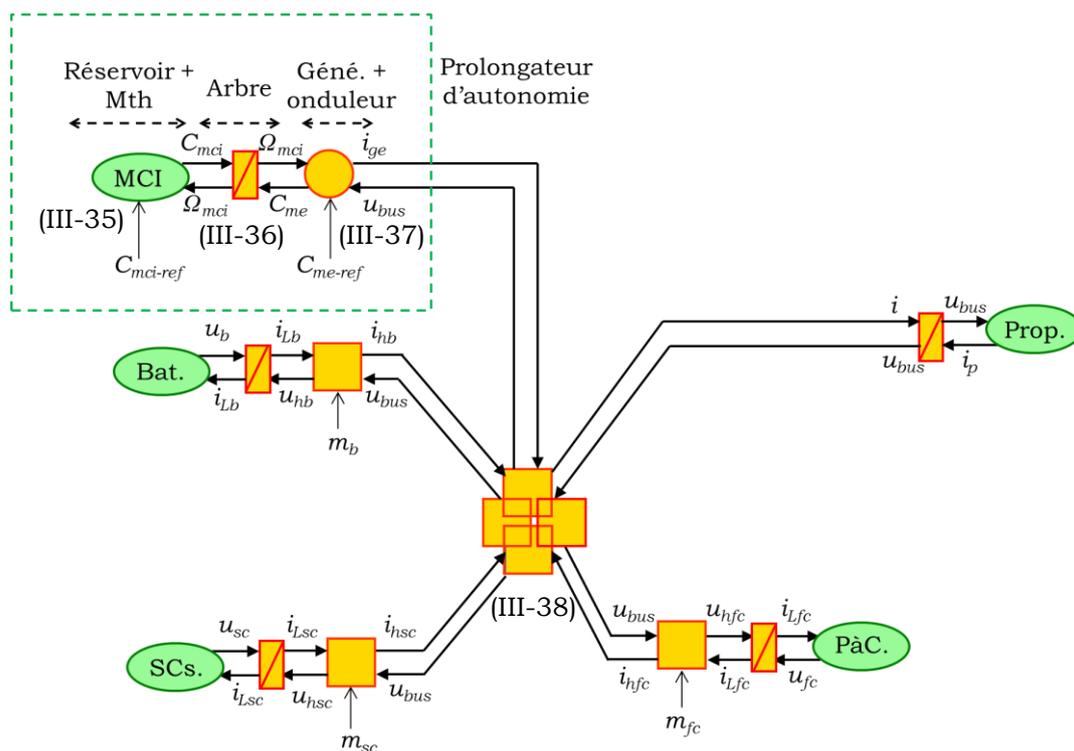


Figure III-22: REM du véhicule hybride à 4 sources

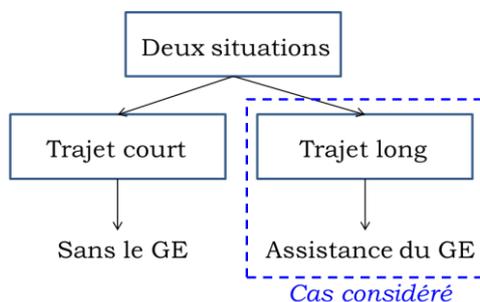


Figure III-23 : cas d'utilisation du GE

Tableau III-10 : synthèse des objectifs des différentes sources (trajet long)

Source	Objectif(s) interne(s)	Priorité
PàC	-	Source principale
SCs	Limiter les sollicitations de la batterie et de la PàC	Source secondaire
Batterie	Limiter les sollicitations de la PàC	Source secondaire
GE	Assister les autres sources	Source secondaire

Deux sources ayant des objectifs internes communs envers les autres sources peuvent être regroupées. Cela est mis en évidence Figure III-24. Le premier regroupement peut se faire entre la batterie et les SCs (source 1). La batterie et les SCs ont un objectif interne commun envers les autres sources, qui consiste à limiter les sollicitations de la PàC. Un second regroupement peut se faire entre la PàC et le système batterie-SCs (source 2). En effet, le système batterie-SCs (source 1) et la PàC ont des objectifs internes relatifs. L'objectif interne du système batterie-SC consiste à agir sur les sollicitations de la PàC. Par conséquent, la source 1 est imbriquée dans la source 2. Le système d'alimentation est finalement constitué de deux sources, le système PàC-batterie-SCs (source 2) et le GE.

Par ailleurs, la règle 1) implique que l'élément de couplage soit subdivisé afin de mettre en évidence les différents sous-ensembles, (III-39), (III-40) et (III-41). Afin d'effectuer l'association des sources deux par deux, l'élément de couplage d'origine est décomposé en éléments de couplages élémentaires. La REM finale du système est représentée Figure III-25. A noter que le regroupement représenté par la source contrôlée S2 inclut également la commande associée comme cela a été réalisé dans la partie précédente (cf. § III.3). Cela représente la REM et la structure de commande du système PàC-batterie-SCs par décomposition (Figure II-16, sans les parties propulsion et bus DC).

$$i_{s1} = i_{hb} + i_{hsc} \quad (III-39)$$

$$i_{s2} = i_{s1} + i_{hfc} \quad (III-40)$$

$$i = i_{s2} + i_{ge} \quad (III-41)$$

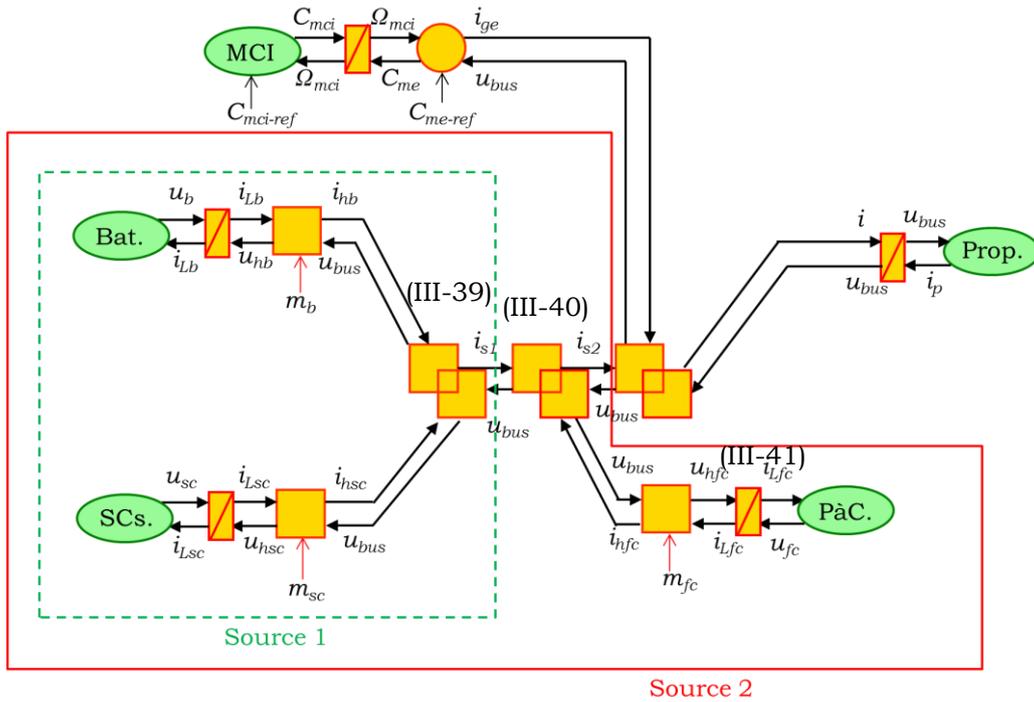


Figure III-24 : principe du regroupement en sous-ensembles

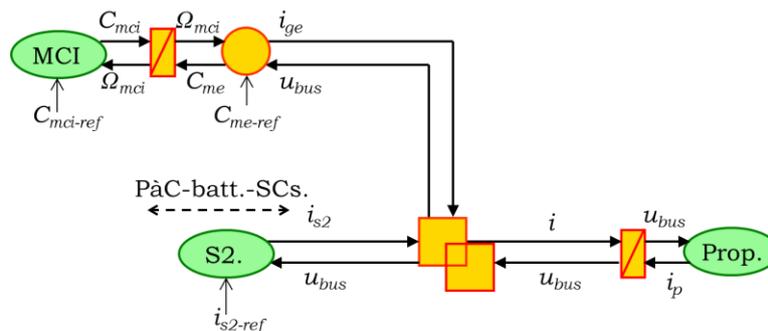


Figure III-25: REM simplifiée du système

### Organisation de la commande du système

La REM et la structure de commande du système PàC-batterie-SCs (source S2), ont été présentées dans la partie précédente (cf. § III.3.2). La structure de commande du système global doit assurer le maintien de la tension du bus continu  $u_{bus}$  (objectif global des sources). La répartition des flux d'énergie entre la source S2 et le GE correspond à l'action de la stratégie. Le GE est utilisé comme assistance de la source S2. Celui-ci n'a pas pour vocation de fournir de l'énergie à la source S2. Le choix est fait de ne pas autoriser de recharge du système PàC-batterie-SCs par le GE. Par conséquent, chaque source doit assurer une part du courant du bus DC. La variable de commande choisie est un coefficient de répartition  $k_R$  du courant  $i_{ref}$  entre les courants  $i_{ge-ref}$  et  $i_{s2-ref}$ . C'est une contrainte du concepteur qui a conduit au choix de la variable de commande (cf. § III.1.3). L'inversion du couplage s'exprime par (III-42).

$$\begin{cases} i_{ge-ref} = k_R i_{ref} \\ i_{s2-ref} = (1 - k_R) i_{ref} \end{cases} \quad (III-42)$$

La REM et la structure de commande du GE sont présentées Figure III-26.a. Il y a deux variables de réglages, le couple de référence  $C_{mci-ref}$  du MCI ainsi que le couple de référence  $C_{me-ref}$  de la machine électrique. Le couple  $C_{me-ref}$  est imposé afin d'obtenir le courant  $i_{ge-ref}$  demandé par la stratégie du système global. La vitesse de référence de l'arbre  $\Omega_{arbre-ref}$  est imposée par la stratégie de gestion d'énergie du GE, afin que le MCI fonctionne à son rendement maximal. La REM et la structure de commande du GE sont rassemblées par la suite, pour former une source de courant équivalente contrôlée. La REM et la structure de commande du système complet sont représentées Figure III-26.b.

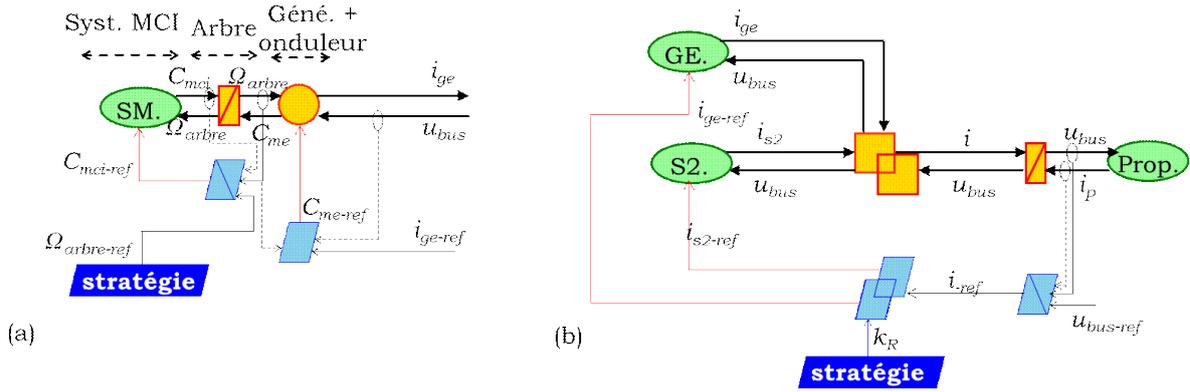


Figure III-26: REM et structure de commande, (a) GE, (b) système global

### III.4.1.4 Stratégie de gestion d'énergie

#### Stratégie du système PàC-batterie-SCs

La stratégie du système PàC-batterie-SCs est la même que dans la partie précédente (cf. § III.3.3), c.à.d. avec le système batterie-SCs comme source équivalente.

#### Stratégie de gestion d'énergie du système global

La stratégie de gestion d'énergie du système global est basée sur l'optimisation. Elle consiste à déterminer les valeurs du coefficient de répartition  $k_R$ , permettant de minimiser un critère de performance défini. La procédure utilisée dans le § II.3.2 est utilisée, afin de formuler le problème de commande optimale.

0. *Définition de la REM du système, et déduction de la structure de commande associée :*  
Cette étape est représentée Figure III-26.

1. *Définition des critères de performances :* l'objectif de l'association du GE au système PàC-batterie-SCs est d'augmenter l'autonomie du véhicule. Dans un véhicule équipé d'un prolongateur d'autonomie, l'utilisation de la source principale sera privilégiée. Le critère de performances consiste à minimiser la consommation de carburant du GE. Celui-ci s'exprime par (III-43), avec  $Q_{carb}$  le débit massique de carburant du MCI.

$$J_6 = \int_{t_0}^{t_f} Q_{carb} dt \quad (III-43)$$

2. *Définitions des variables du problème et des contraintes associées :* à l'échelle du système source S2/GE, la source S2 est la source de priorité principale et le GE est la source de priorité secondaire. Le choix de la variable d'état se porte vers l'énergie  $E_{ge}$  aux bornes du GE. Cela revient à contrôler les variations de la consommation de carburant  $M_{carb}$  du GE. Une décharge de celui-ci entre le début et la fin de l'horizon du cycle de conduite considéré est imposée. Cela est communément appelée une contrainte de « charge depleting ». Cette contrainte est exprimée par (III-44), avec  $M_{carb-M}$  la consommation de carburant du MCI, désirée à la fin de l'horizon du cycle de conduite considéré. Par ailleurs, la non-réversibilité du GE conduit à l'absence de limitations (contraintes de

type inégalité) sur la variable d'état. A noter que selon la longueur du trajet, la consommation de carburant tolérée peut être plus ou moins importante. D'après la structure de commande du système (Figure III-26.b), la variable de commande à imposer est le coefficient de distribution  $k_R$ . Des limitations sont imposées sur cette variable. Celles-ci s'expriment par (III-45). Les variables exogènes sont la tension de référence du bus DC et le courant  $i_p$  du système de propulsion.

$$M_{carb}(t_f) = M_{carb-M} \quad (III-44)$$

$$0 \leq k_R \leq 1 \quad (III-45)$$

3. *Description mathématique du problème de commande optimal* : la description mathématique du problème de commande optimale, passe par la réduction du modèle du système. Les dynamiques du bus DC ne sont pas prises en compte. La tension du bus continu est considérée comme étant parfaitement maintenue constante. La REM et la structure de commande du modèle d'optimisation sont présentées Figure III-27. En ce qui concerne le critère de performances, une interpolation du second ordre de l'évolution du débit de carburant  $Q_{carb}$  en fonction de la puissance du GE est réalisée. Le débit de  $Q_{carb}$  s'exprime par (III-48) avec  $a_{ge}$ ,  $b_{ge}$  et  $c_{ge}$  les coefficients de l'interpolation du second ordre en fonction de la puissance fournie par le GE. Par ailleurs, le débit de  $H_2$  consommé est exprimé par (III-17).

La stratégie du  $\lambda$ -control est employée. Le Hamiltonien  $H_{\delta p}$  est défini par (III-46). L'expression optimale du coefficient de distribution  $k_R$  est donnée par (III-46) avec  $PCI_{carb}$  le pouvoir calorifique inférieur de l'essence.

$$\begin{aligned} H_{\delta p}(E_{ge}(t), k_R(t), s_{ge-ref}(t)) \\ = PCI_{carb} (a_{ge}(u_{bus}k_R i_{-ref})^2 + b_{ge}u_{bus}k_R i_{-ref} + c_{ge}) + s_{ge-ref}(t) \frac{d}{dt} E_{ge} \end{aligned} \quad (III-46)$$

L'expression optimale de la variable de commande  $k_R$  s'exprime par (III-47). De plus amples détails sur les calculs sont donnés Annexe F.

$$k_R^* = \frac{s_{ge-ref} - PCI_{carb} b_{ge}}{2PCI_{carb} a_{ge} i_{-ref} u_{bus}} \quad (III-47)$$

$$\begin{cases} Q_{carb} = a_{ge}(u_{bus}k_R i_{-ref})^2 + b_{ge}u_{bus}k_R i_{-ref} + c_{ge} \\ i_{-ref} = i_p \end{cases} \quad (III-48)$$

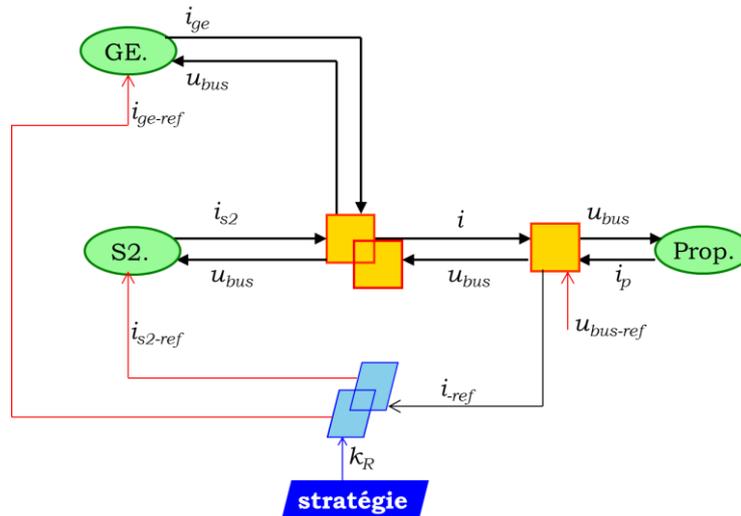


Figure III-27: REM et structure de commande du modèle réduit du système global

### Résultats de simulations

L'association de la batterie et des SCs (avec la commande relative) à la PàC permet de maintenir un courant constant de la PàC (Figure III-28.a). La stratégie du système global impose un profil au courant du GE de manière à limiter la consommation de carburant de celui-ci (Figure III-28.b). La stratégie du GE (interne) consiste à asservir la vitesse de rotation de l'arbre correspondant de manière à travailler au point de rendement maximal du MCI (Figure III-30.b). A noter que l'évolution du rendement du MCI en fonction de sa température devrait être prise en compte [Horrein 2015a]. Les limitations associées au système batterie-SCs sont respectées (Figure III-29). La contrainte de « charge sustaining » associée au système batterie-SCs est respectée (Figure III-30.a). La valeur initiale du facteur d'équivalence du GE  $S_{ge-ref}$  imposée, conduit à une consommation de carburant du MCI de 0,1 L sur le cycle, soit l'équivalent de 3 L/100 km.

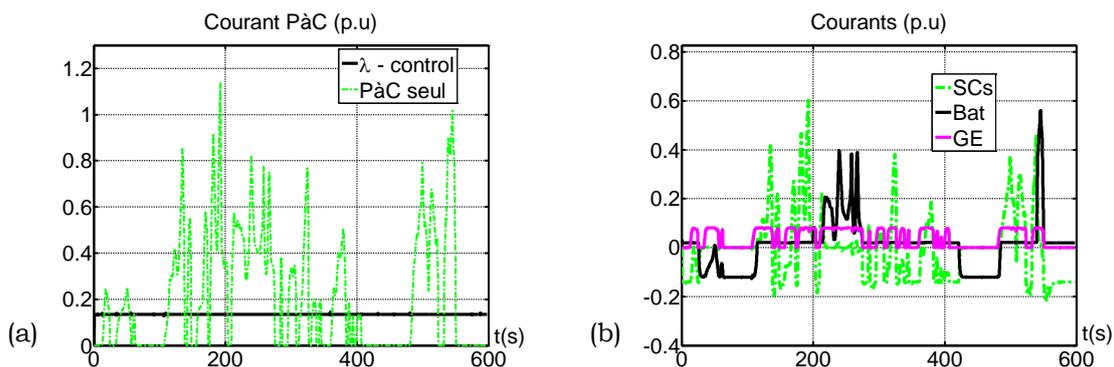


Figure III-28 : 4 sources, (a) courants de la PàC, (b) courants du convertisseur de la batterie, du convertisseur des SCs et du GE

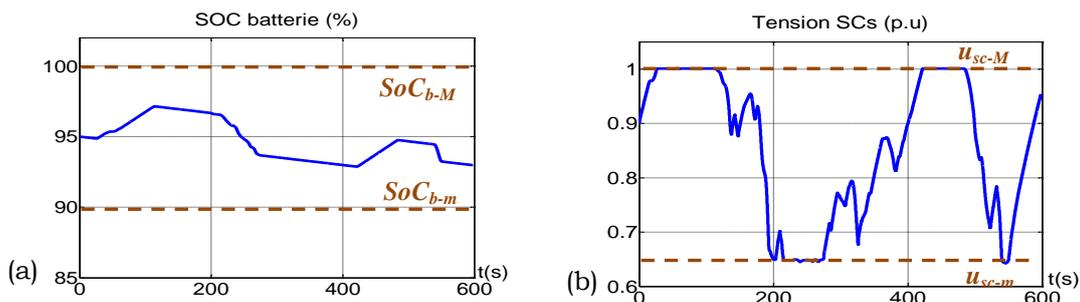


Figure III-29 : 4 sources, (a) état de charge de la batterie, (b) tension des SCs

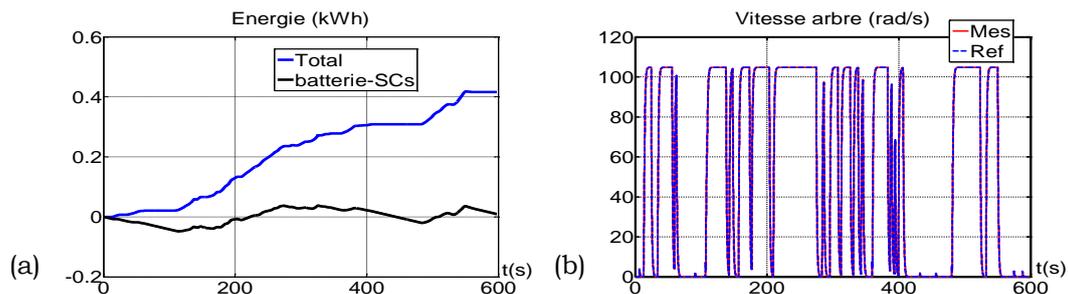


Figure III-30 : 4 sources, (a) énergie mise en jeu, (b) vitesse angulaire de l'arbre du GE

La synthèse de la stratégie de gestion d'énergie d'un véhicule comportant un système d'alimentation à 4 sources a été réalisée. Le système a été géré en utilisant l'approche décomposée proposée précédemment (cf. § III.3). La source équivalente formée par la batterie et les SCs (avec la commande associée) permet de limiter les sollicitations de la PàC, et contribue à la réduction de la consommation de  $H_2$  du véhicule. Le GE assiste la source équivalente formée de la source batterie-SCs et de la PàC avec la commande associée, dans la fourniture de la puissance appelée par le système de propulsion du véhicule. L'utilisation de la REM a permis de synthétiser la stratégie de gestion d'énergie du véhicule de manière structurée.

### III.4.2 Vers les véhicules à N sources

Cette partie vise à donner des éléments de base afin de gérer des véhicules comportant des systèmes d'alimentation à N sources. Cette analyse est fondée sur les méthodes qui ont été utilisées dans les travaux de cette thèse afin de gérer des véhicules composés de 2 à 4 sources d'énergie.

#### III.4.2.1 Synthèse de la gestion d'énergie d'un véhicule multi-source

Conformément à la démarche détaillée jusqu'ici pour des véhicules ayant deux, trois ou 4 sources, une méthode pour la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie d'un véhicule multi-source pourrait se résumer par les sept étapes suivantes :

- 0 - *Définition des objectifs* : la première étape consiste à analyser les différentes sources constituant le système d'alimentation, afin de définir les différents objectifs associés (objectifs internes et objectif global)
- 1 - *REM du système* : la REM du système permet de mettre en évidence les différents flux énergétiques possibles. La REM est réalisée par l'intermédiaire d'éléments de couplages élémentaires (décomposition), afin de mettre en évidence les différents regroupements de sources possibles.
- 2 - *Structure de commande et variables de commande* : la structure de commande du sous-système d'alimentation est déduite de sa REM. Cela permet de mettre en évidence les différentes possibilités de sorties de la stratégie (variables de commande).
- 3 - *Décomposition en sources équivalentes* : à partir de la REM et de l'analyse des différents objectifs, les éléments à contrôler individuellement (sources équivalentes) peuvent être choisis. Cet aspect est essentiel dans la perspective de gestion de systèmes à nombre de sources élevé. Les sources équivalentes sont composées du regroupement des sources concernées avec la commande associée.
- 4 - *Choix des méthodes de gestion à utiliser* : la gestion d'énergie du système est effectuée avec les stratégies de chaque source équivalente, et de la stratégie externe, assurant la gestion d'énergie entre les différentes sources équivalentes. Le choix peut être fait d'utiliser la même approche pour toutes les stratégies, ou de faire un mixte (optimisation-règles ou encore optimisation avec méthodes de résolution différentes).
- 5 - *Formulation du problème d'optimisation* : dans le cas de l'utilisation d'une stratégie à base d'optimisation, il faut réaliser la formulation du problème de commande optimale. La méthode utilisée a été détaillée Chapitre II. Cela passe notamment par la réduction du modèle du système complet, guidée par la REM.
- 6 - *Résolution du problème de commande optimale* : après avoir formulé le problème de commande optimale (stratégie à base d'optimisation), la résolution peut être réalisée.

Afin de réaliser ces différentes étapes, certains points sont détaillés par la suite.

#### III.4.2.2 Etape 0 : objectifs

Pour réaliser la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie, il est nécessaire de définir les objectifs des sources (cf. § I.3.1). En effet, la commande du système est relative à ceux-ci. Deux types d'objectifs des sources sont distingués dans les travaux présentés dans le cadre de cette thèse. Il y a les *objectifs internes* des sources ainsi que l'*objectif global* du système d'alimentation. Les objectifs internes d'une source sont ses objectifs vis-à-vis des autres sources. L'objectif global du sous-système d'alimentation, correspond à l'objectif de l'association des sources vis-à-vis du reste du système. L'objectif global du sous-système d'alimentation d'un véhicule, est de répondre à ses besoins énergétiques. Les objectifs internes des sources dépendent du but du concepteur (raison de cette association). Le lecteur pourra se référer à la partie § I.3.1.3 pour de plus amples détails sur ce sujet. A noter que, dans le cas d'une stratégie à base d'optimisation, le critère de performances sera relatif au but du concepteur du système.

### III.4.2.3 Etape 1 : REM du système

L'étape 1 consiste à réaliser la REM du système. La REM du système est réalisée en décomposant les éléments de couplages, en éléments de couplage élémentaires (Figure III-31). Cela permet de mettre en évidence les différents regroupements possibles.

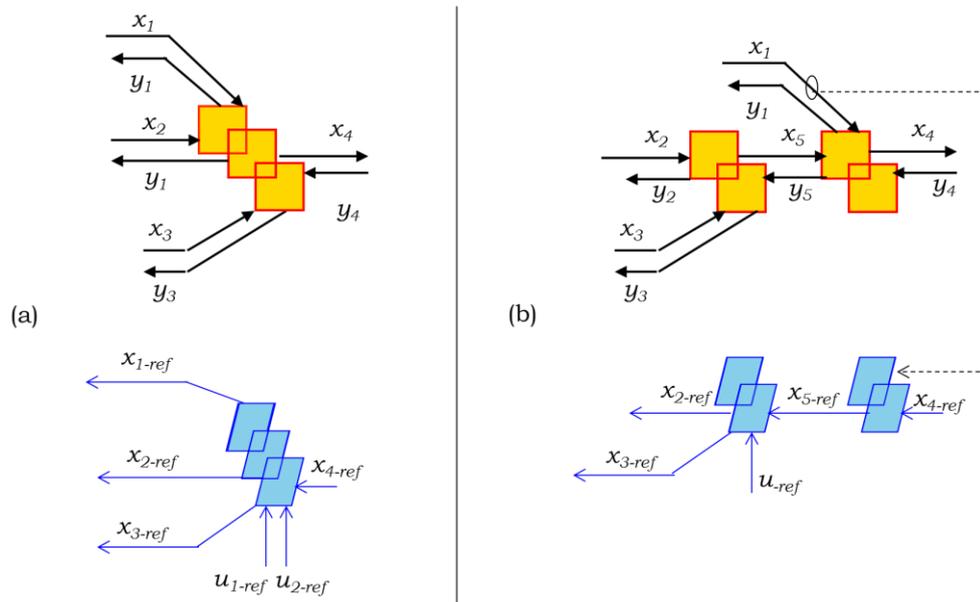


Figure III-31 : (a) inversion directe, (b) décomposition en éléments de couplages élémentaires

### III.4.2.4 Etape 2 : structure de commande et variables de commande

L'étape 2 consiste à réaliser la structure de commande du sous-système d'alimentation, et à déterminer la ou les variable(s) de commande associée(s). Cette étape est par conséquent relative à l'organisation de la commande du système (niveau « local » et niveau « global »). En effet, les variables de commande sont les sorties de la stratégie de gestion d'énergie. Cette organisation est réalisée en fonction des objectifs relatifs au sous-système d'alimentation (cf. étape 0).

*Structure de commande* : la structure de commande est réalisée afin d'assurer l'**objectif global** du sous-système d'alimentation. De plus, toutes les sources de ce sous-système participent à cet objectif. Dans le cas des véhicules étudiés dans cette thèse, l'objectif global (fourniture de la puissance de propulsion) s'est traduit par l'asservissement de la tension du bus DC. Les structures de commandes ont été par conséquent définies, en faisant converger les chaînes de réglages de chaque branche sur la tension du bus DC.

*Variables de commande* : les variables de commande sont déterminées afin d'assurer les **objectifs internes** des sources. En effet, celles-ci correspondent aux sorties de la stratégie, et donc à la manière dont les flux d'énergie seront répartis entre les sources. Ce sont certains **éléments de couplage** qui mettent en évidence les différents degrés de libertés associés au système. Par conséquent, les variables de commande correspondent aux

différentes manières de gérer ces éléments de couplage. Deux types de variables de commandes peuvent être utilisés. Le premier type de variables de commande, correspond aux références des grandeurs associées aux éléments de couplage. Le second type de variables de commande, consiste à utiliser des coefficients de répartition entre les entrées et les sorties de l'inversion de l'élément de couplage (cf. § III.1.3). Ces choix dépendent des contraintes liées au système (réversibilité des sources) et à celles imposées par le concepteur du système (flux internes autorisés ou non).

#### III.4.2.5 Etape 3 : décomposition en sources équivalentes

Cette étape consiste à définir les différents sous-ensembles à gérer de manière indépendante. Les notions d'objectifs internes et d'objectif global des sources sont essentielles, afin de réaliser la commande du véhicule multi-source. Deux sources ayant des objectifs internes communs envers les autres sources peuvent être regroupées (avec leur commande associée), pour former une source équivalente contrôlée. Par conséquent, la commande du système global peut être simplifiée (cf. § III.3). Aussi, une source équivalente peut correspondre également au regroupement d'une source, des convertisseurs d'énergie associés, et de la commande correspondante. Il peut-être plus intéressant dans certains cas de gérer les sources équivalentes par une stratégie à base de règles, et le système global par une stratégie à base d'optimisation. C'est ce qui est utilisé en partie dans le cas du véhicule à 4 sources (cf. § III.4.1), où le GE et les freins mécaniques (propulsion) ont été gérés par l'intermédiaire de règles tandis que le système global et la source équivalente PàC-batterie-SCs ont été gérés par des stratégies à base d'optimisation. En d'autres termes, cette idée revient à prendre en compte ou non certains degrés de liberté dans la stratégie à base d'optimisation. Cet aspect a été abordé dans les travaux de L. Horrein, par l'organisation de la stratégie de gestion d'énergie d'un véhicule hybride en différents niveaux, en prenant en compte l'énergie du chauffage de l'habitacle [Horrein 2015].

#### III.4.2.6 Etape 4 : choix des méthodes de gestion

L'étape 4 concerne le cas où le choix est fait de réaliser la commande du sous-système d'alimentation, par décomposition en sources équivalentes. Cette étape est illustrée Figure III-32, dans le cas d'un sous-système d'alimentation composé exclusivement de sources contrôlées. Une approche identique peut être utilisée pour toutes les stratégies, ou le choix peut être de faire un mixte (optimisation-règles ou encore optimisation avec différentes méthodes de résolution). Cela illustre l'un des points forts de la méthodologie proposée, la flexibilité. En effet, dans le cas où le sous-système d'alimentation serait géré de manière global, une méthode de gestion unique serait utilisée.



modèle réduit du système respectant les propriétés physique de celui-ci. Par ailleurs cela doit respecter certaines règles. La règle principale est que l'élément de couplage traduisant la connexion entre les sources doit être conservé dans le modèle réduit. La méthode de résolution du  $\lambda$ -control a été utilisée dans les travaux présentés. Le point clé de cette méthode réside dans la valeur des multiplicateurs de Lagrange. Les valeurs initiales des multiplicateurs de Lagrange sont définies par itération en simulant de modèle réduit du système. Cela permet un gain de temps important. Par exemple, la simulation du modèle complet du véhicule à 4 sources (cf. § III.4.1) sur le cycle WLTC classe 2 prend 4 min avec un pas fixe de 1 ms. La simulation du modèle réduit du système prend quant à elle 11 s. Ce modèle réduit peut également trouver un intérêt dans l'utilisation de stratégies à base de règles. En effet, cela peut permettre d'effectuer des simulations préalables afin de déterminer les paramètres de la stratégie.

### III.4.2.8 Etape 6 : résolution du problème (optimisation)

L'étape 6 est également relative aux stratégies à base d'optimisation. Elle concerne l'étape de résolution du problème de commande optimale. C'est l'étape où la détermination des paramètres de la stratégie est réalisée.

Dans le cas de l'application du  $\lambda$ -control, les multiplicateurs de Lagrange sont associés aux variables d'états. Par conséquent, plus il y a de sources, plus le nombre de multiplicateurs de Lagrange augmente. Or, cela signifie que la résolution du problème de commande optimale se complexifie. En prenant le cas d'un sous-système d'alimentation composé de  $N$  sources, une source de priorité principale et les autres sources étant secondaires. Il y aura par conséquent  $N-1$  variables d'états (III-49). Ce qui conduit à imposer  $N-1$  multiplicateurs de Lagrange (III-51). En considérant qu'il y a  $m$  variables de commande (III-50), le critère de performances  $J$  s'exprime par (III-52) et le Hamiltonien  $H$  par (III-53).

$$x(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_{N-1}(t)\} \quad \text{(III-49)}$$

$$u(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)\} \quad \text{(III-50)}$$

$$\lambda(t) = \{\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_{N-1}(t)\} \quad \text{(III-51)}$$

$$J(u) = \int_{(T)} L(x(t), u(t)) dt \quad \text{(III-52)}$$

$$H(x(t), u(t), \lambda(t)) = L(x(t), u(t)) + \lambda^T(t) \frac{d}{dt} x(t) \quad \text{(III-53)}$$

La détermination des valeurs initiales des multiplicateurs de Lagrange peut être facilitée des deux manières suivantes :

- *Analyse des contraintes relatives aux variables d'état* : pour un système avec une source principale et des sources secondaires, les multiplicateurs de Lagrange (facteurs d'équivalence dans le cas de l'ECMS) seront associés aux sources secondaires. Si les variables d'états associées aux sources secondaires, ont les mêmes types de contraintes associées d'une part, et que les sources sont interfacées par les mêmes convertisseurs d'énergie d'autre part (pertes équivalentes), les multiplicateurs de Lagrange auront les mêmes valeurs. Ce sont les limitations associées aux variables d'état qui vont conduire aux différences entre les multiplicateurs de Lagrange. Par exemple, dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs, en utilisant l'approche globale, la batterie et les SCs ont toute deux des contraintes de « charge sustaining » associées. De plus, elles sont interfacées par le même convertisseur d'énergie (convertisseur DC-DC et bobine identiques). En imposant des limitations de la tension des SCs de telle sorte à ce que celle-ci ne soit pas en limitation (cf. Figure III-33), les valeurs initiales des facteurs d'équivalence associés sont quasi-identiques ( $s_{sc}=-1,6227$  et  $s_b=-1,6229$ ).

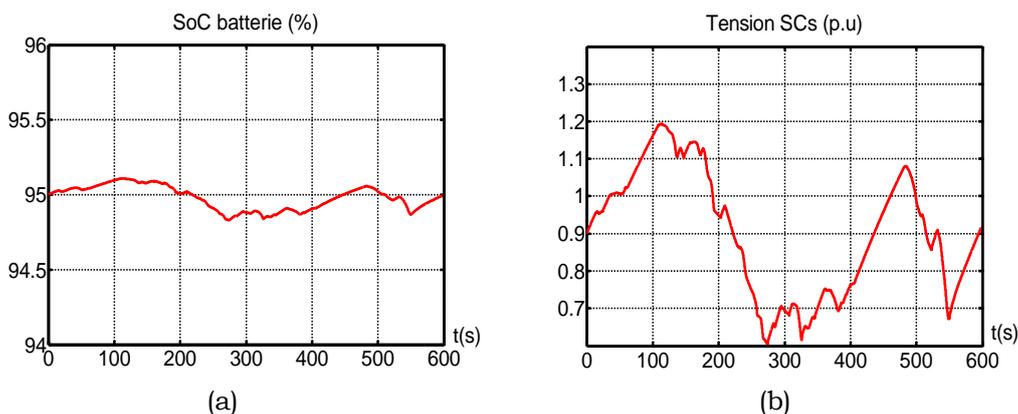


Figure III-33 : PàC-batterie-SCs sans limitations sur la tension des SCs

Une manière de trouver les valeurs initiales des multiplicateurs de Lagrange, est de déterminer celle du multiplicateur relatif à la variable d'état susceptible d'être le plus régulièrement en limitation. Cela est fait en imposant la même valeur initiale aux autres multiplicateurs de Lagrange. Ces valeurs sont ajustées ensuite pour assurer le respect de la contrainte de charge sustaining pour toutes les autres sources secondaires. C'est la procédure qui a été utilisée dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs. Celle-ci a été synthétisée dans le § III.2.3.

- *Utilisation d'approches différentes* : le regroupement de certaines sources (avec leurs commandes associées) en sources équivalentes peut faciliter la détermination des valeurs initiales des multiplicateurs de Lagrange. Dans le cas où certaines des sources équivalentes sont gérées par des stratégies basées sur d'autres approches (règles par exemple), cela réduit le nombre de multiplicateurs de Lagrange à trouver. Par conséquent, la résolution du problème de commande optimale est simplifiée.

### III.5 Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était de réaliser la synthèse d'une stratégie de gestion d'énergie à base d'optimisation pour un véhicule composé d'un système d'alimentation à plus de 2 sources.

Dans la première partie, le système d'alimentation en énergie était constitué d'un système PàC, d'une batterie ainsi que de supercondensateurs. La commande du système a été réalisée de deux manières différentes. Le système a premièrement été analysé de manière globale. La formulation du problème de commande optimale a été effectuée par l'intermédiaire de la REM du système, en utilisant la méthode présentée Chapitre II.

La seconde méthode a consisté à réaliser la gestion d'énergie du véhicule par décomposition en sources équivalentes (approche décomposée). Le système batterie-SCs a été considéré comme une source de courant équivalente. Cela a permis de simplifier la synthèse de la gestion d'énergie. En effet, le système batterie-SCs a été géré par une commande « interne » tandis que le système source équivalente-PàC a été géré par une commande « externe ». Cette décomposition a été réalisée par l'intermédiaire du formalisme REM.

Les résultats de simulations ont été comparés entre les deux méthodes. La consommation de  $H_2$  a été inférieure dans l'approche décomposée par rapport à l'approche globale (-7 %). Cependant, la batterie a été plus sollicitée (variations de l'état de charges plus importantes).

Les différents principes ont été étendus ensuite dans le cas d'un véhicule à 4 sources, système PàC-batterie-SCs-système MCI. Cela a permis de poser des bases pour la gestion d'énergie d'un système à N sources à partir de la REM. Dans le cas d'un véhicule à N sources, il est primordial de trouver des moyens de simplifier la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie. La gestion d'énergie par décomposition peut être un moyen intéressant de simplification. La simplification de la résolution de stratégies à base d'optimisation peut être envisagée par l'utilisation de l'approche proposée, notamment grâce à la flexibilité induite dans le choix des stratégies de gestion d'énergie. Par exemple, certaines sources peuvent être gérées par des méthodes de gestion à base de règles tandis que le système global peut être géré par une stratégie à base d'optimisation (et vice versa). Dans le cas de l'utilisation du *Calcul des Variations* comme méthode de résolution, le nombre de multiplicateurs de Lagrange à trouver (valeurs initiales) sera réduit, et le  $\lambda$ -control utilisé comme méthode d'adaptation au temps réel. Dans le chapitre suivant, les concepts développés vont être validés expérimentalement.



# Chapitre IV : Validation expérimentale des stratégies

## Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de présenter la validation de certaines des stratégies développées dans cette thèse, sur une plateforme expérimentale utilisant des sources réelles, avec l'émulation du système de propulsion d'un VE. Des stratégies à base d'optimisation ont été réalisées pour des véhicules multi-sources dans les chapitres précédents.

Après avoir présenté le cadre des travaux expérimentaux, une comparaison entre une stratégie à base d'optimisation issue des travaux réalisés dans cette thèse et une stratégie à base de règles sera présentée pour un véhicule batterie-SCs. Dans un second temps, la comparaison sera réalisée dans le cas d'un véhicule PàC-batterie-SCs.

## Plan du chapitre

IV.1	Emulation du véhicule électrique Tazzari Zéro .....	- 110 -
IV.1.1	Principe de l'émulation temps réel .....	- 110 -
IV.1.2	Le véhicule Tazzari Zéro .....	- 111 -
IV.2	Cas du véhicule électrique batterie-SCs.....	- 113 -
IV.2.1	Emulation du véhicule .....	- 113 -
IV.2.2	Comparaison avec une stratégie à base de règles .....	- 115 -
IV.3	Cas du véhicule PàC-batterie-SCs .....	- 121 -
IV.3.1	Emulation du véhicule .....	- 121 -
IV.3.2	Comparaison des stratégies de commande.....	- 124 -
IV.4	Conclusion du chapitre.....	- 134 -

## IV.1 Emulation du véhicule électrique Tazzari Zéro

### IV.1.1 Principe de l'émulation temps réel

L'émulation temps réel est également appelée « Hardware-In-the-Loop » simulation (ou simulation HIL). Comme son nom l'indique, cela consiste à incorporer des éléments matériels dans la boucle de simulation. Différentes simulations HIL ont été organisées par l'intermédiaire de la REM [Bouscayrol 2009], [Allègre 2010a], [Letrouvé 2013]. Il existe deux grands types de simulations HIL [Bouscayrol 2011] :

- *Simulation HIL de type signal* : l'ECU (Electronic Control Unit) est testé avant son implantation dans le système global. Un environnement de simulation (temps réel) remplace la partie puissance du système. Ce sont les modèles des éléments de la partie puissance qui sont simulés en temps réel. Le principe de la simulation HIL de type signal est présenté Figure IV-1.

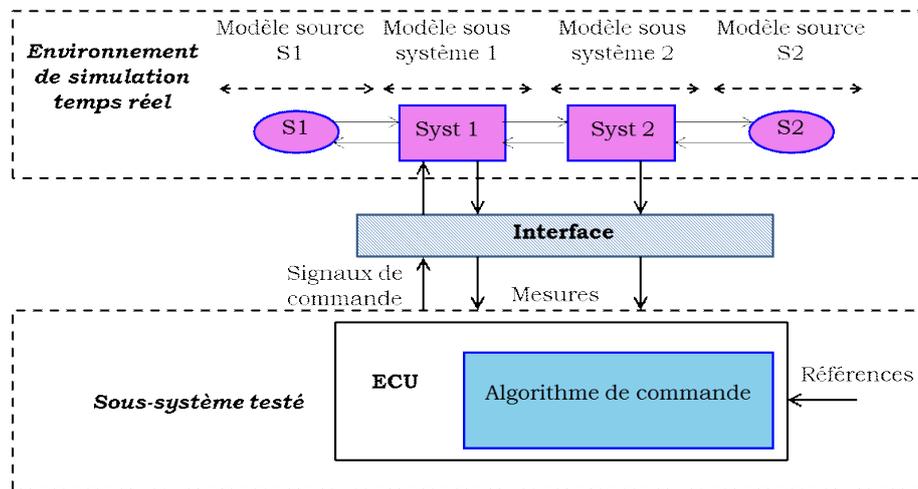


Figure IV-1 : principe de la simulation HIL de type « signal »

- *Simulation HIL de type puissance* : outre l'ECU, des éléments de la partie puissance peuvent être testés avant leur implémentation dans le système. Cela est particulièrement utile pour tester des systèmes avec leur commande. Généralement, la commande du système est implémentée dans un ordinateur autre que celui qui sera prévu pour l'industrialisation. Dans ce type d'opération, c'est la commande qui est validée et non pas l'ECU. Un ordinateur unique est utilisé dans les travaux réalisés dans cette thèse. Dans la simulation HIL de type puissance, la partie puissance est séparée en deux parties, la partie à tester (associée à sa commande) et la partie à émuler (Figure IV-2). Une interface est nécessaire pour établir la connexion entre des grandeurs issues de simulations et celles de puissance. Par conséquent, l'interface doit contenir des éléments de puissance. Ces éléments de puissance composent le sous-système d'émulation. Le système d'émulation doit avoir le même comportement que le système simulé. Les références de la commande du système d'émulation proviennent, par conséquent, de la simulation du sous-système émulé (Figure IV-3).

Aussi, il est nécessaire que l'interface soit plus rapide que le système émulé. Par ailleurs, la puissance du système d'émulation peut être différente de celle du système émulé. Cela concerne l'émulation à échelle réduite. La simulation HIL de type puissance est utilisée dans le cadre des travaux relatifs à cette thèse.

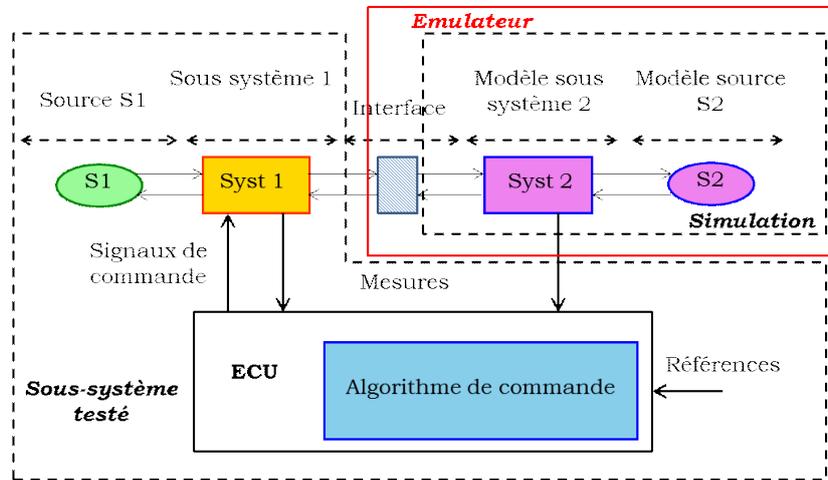


Figure IV-2 : principe de la simulation HIL de type « puissance »

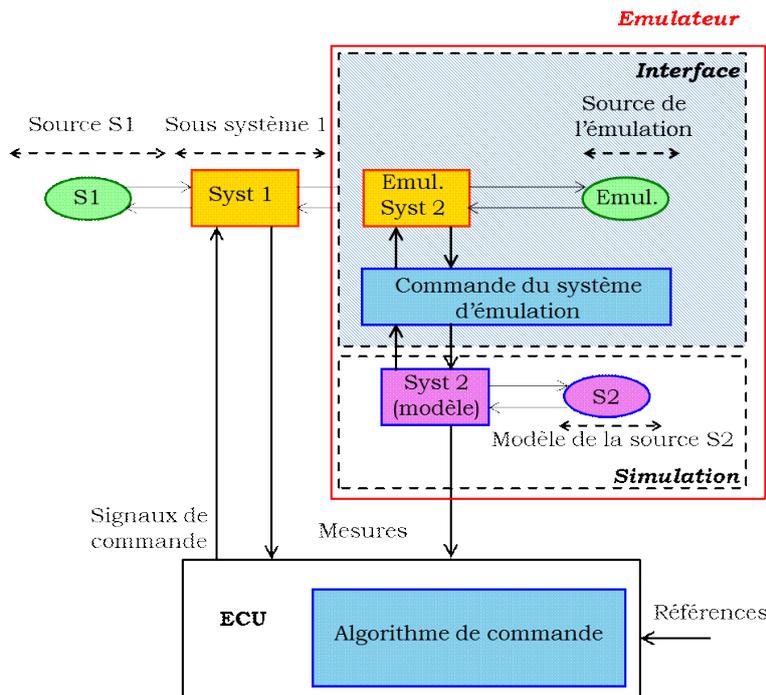


Figure IV-3 : structure pratique de la simulation HIL de type « puissance »

## IV.1.2 Le véhicule Tazzari Zéro

### Projet Tazzari Zéro

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet « Tazzari Zéro ». Ce projet consiste à émuler le véhicule électrique commercial Tazzari Zero que possède le L2EP, afin de valider des méthodes de gestion d'énergie. Le projet « Tazzari Zéro » est divisé en deux parties, l'étude du véhicule avec une batterie seule (configuration d'origine) et l'étude du véhicule en

configuration multi-source (Figure IV-4). Les travaux présentés sont relatifs à l'émulation du véhicule dans une configuration multi-source. A noter que l'émulation du système de propulsion du véhicule a été réalisée dans le cadre d'une thèse en cours, en partenariat avec l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Cela s'inscrit dans le cadre du projet MEGEVH multi-source, qui consiste à réaliser l'étude de véhicules à propulsion électrique, alimentés par plusieurs sources d'énergie, avec la prise en compte de la durée de vie des sources. Les caractéristiques du véhicule sont données Tableau IV-1<sup>1</sup>. C'est un quadricycle léger (542 kg à vide).

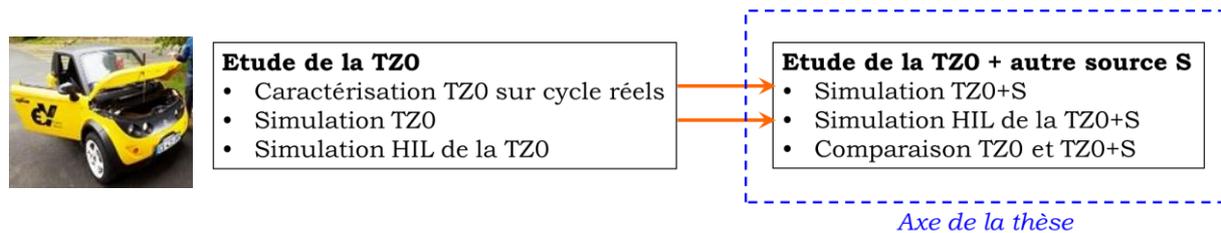


Figure IV-4 : projet Tazzari Zéro

Tableau IV-1: données techniques de la Tazzari Zéro

Elément	Caractéristiques
Masse et dimensions	Masse à vide (batterie comprise) : 542 kg Longueur : 2,88 m   Largeur : 1,56 m   Hauteur : 1,425 m
Performances (constructeur)	Autonomie : 140 km (mode « Economy ») Vitesse maximale : 100 km/h
Machine électrique	Type : asynchrone à cage Vitesse de rotation maximale : 4900 tr/min Puissance nominale : 15 kW   Puissance maximale : 21 kW
Pneus	Dimensions : 175   55 R15 (diamètre 0,573 m)
Transmission mécanique	Rapport du réducteur : 4,32   Rendement : 92 %

### Objectifs des travaux présentés

Les travaux présentés dans ce chapitre ont deux objectifs :

- *Evaluation de la faisabilité des stratégies développées dans le cadre la thèse* : cela consiste à s'assurer que les stratégies développées répondent bien aux critères relatifs à l'application en temps réel, notamment l'*applicabilité* et la *sécurité* du système (cf. Chapitre II).
- *Comparaison des performances des stratégies développées par rapport à une stratégie de filtrage* : cette partie vise à évaluer l'apport des stratégies développées par rapport à une stratégie à base de règles, le filtrage cf. § I.3.2). Celle-ci a été employée dans plusieurs travaux sur les véhicules multi-sources et est simple à implémenter en temps réel [Tani 2012], [Azib 2014].

<sup>1</sup> Les caractéristiques de la batterie sont données dans le § II.1

## IV.2 Cas du véhicule électrique batterie-SCs

Le véhicule batterie-SCs étudié Chapitre II est émulé dans cette partie. L'émulation du véhicule est réalisée en deux parties, l'émulation du système de propulsion ainsi que l'émulation du système d'alimentation. C'est une simulation HIL de type « puissance ».

### IV.2.1 Emulation du véhicule

#### IV.2.1.1 Architecture du système

Le système étudié se compose de la batterie, du système de propulsion et des SCs avec leur convertisseur DC-DC associé (avec la bobine de lissage, Figure IV-5.a). L'objectif de la simulation HIL réalisée ici n'est pas de tester des éléments du système, mais de tester la répartition des flux d'énergie entre les sources. Le choix est fait de garder le type de SCs d'origine (15 V, 58 F), et de définir une interface afin d'émuler la batterie et le système de propulsion. La batterie et le système de propulsion sont émules car ce sont des éléments qui ne sont pas disponibles sur la plateforme.

Le système de propulsion est considéré comme étant une source de courant. Il est remplacé par un système se comportant comme une source de courant contrôlable. Le système choisi pour l'émulation du système de propulsion est un ensemble SCs-bobine-convertisseur DC-DC (Figure IV-5.b).

La batterie est émulée par l'intermédiaire d'un élément se comportant comme une source de tension contrôlable. L'élément choisi est le condensateur de filtrage d'un bus continu. Celui-ci est alimenté par l'intermédiaire d'un ensemble SCs-bobine-convertisseur DC-DC. La batterie peut être émulée par cet ensemble car l'émulateur est effectivement plus rapide que le système à émuler (Figure IV-5.b).

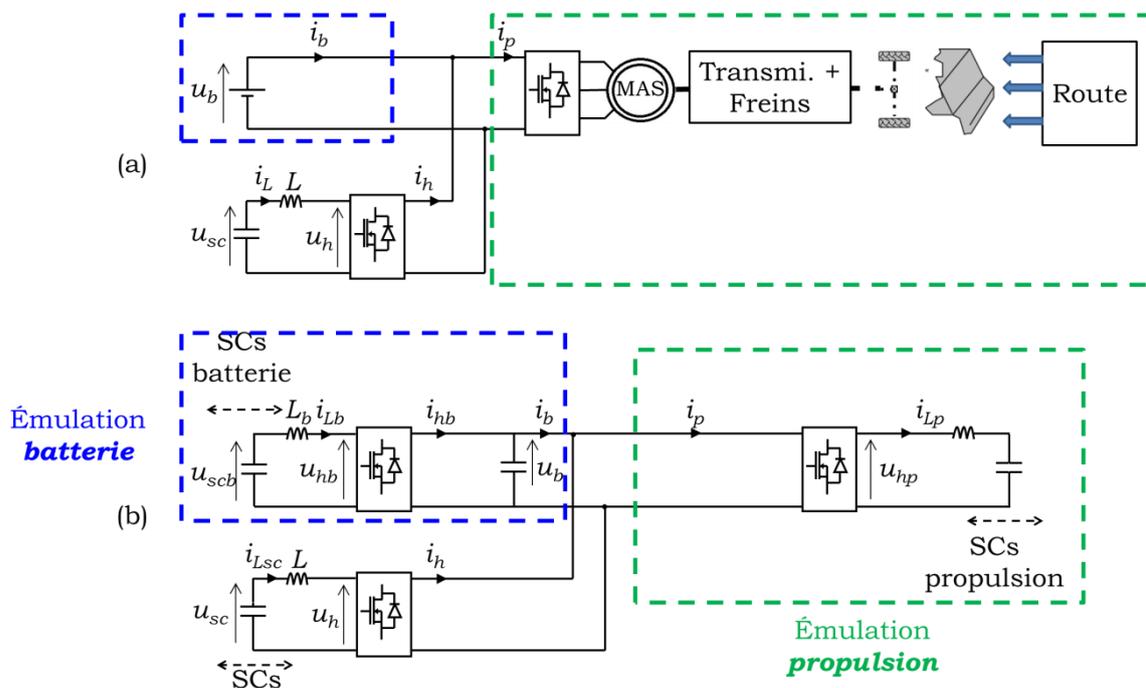


Figure IV-5 : (a) système d'origine, (b) système expérimental

### IV.2.1.2 Commande du système

La commande du système expérimental est réalisée par l'intermédiaire de la REM. Une étape de modélisation a été réalisée au préalable. Les modèles des éléments sont les mêmes que ceux présentés Chapitre II. La REM et la structure de commande du système expérimental en sont déduites (Figure IV-6). Les références des systèmes d'émulation, le courant  $i_{p-ref}$  pour l'émulation du système de propulsion ainsi que la tension  $u_{b-ref}$  pour la batterie, sont issues de la simulation des modèles des éléments associés (blocs ovales magenta).

Par ailleurs, le système est émulé à échelle réduite. Des éléments d'adaptation de puissance sont incorporés afin de prendre en compte l'échelle réduite tout en assurant une bonne validité des résultats [Allègre 2010a]. Les contraintes du système à pleine échelle sont prises en compte par l'intermédiaire des coefficients d'adaptation de puissance associés.

En ce qui concerne l'émulation du système de propulsion, un coefficient d'adaptation  $k_{i-prop}$  permet de passer du courant  $i_{p-HP}$  issu du modèle du système de propulsion à pleine échelle, au courant de référence  $i_{p-ref}$  de l'émulateur à échelle réduite du système de propulsion. De même, un coefficient  $k_{u-prop}$  permet de passer de la tension mesurée  $u_{b-mes}$  du bus DC à la tension  $u_{bp-HP}$  imposée au modèle du système de propulsion. Cela s'exprime par la relation (IV-1). A noter que le modèle de la propulsion ne consiste pas uniquement à imposer un profil de courant. C'est la simulation en temps réel du modèle des éléments du système de propulsion et de la commande associée qui fournissent la référence de ce courant. (cf. Annexe B).

Concernant l'émulation de la batterie, un coefficient d'adaptation  $k_{u-bat}$  permet de passer de la tension  $u_{b-HP}$  issu du modèle de la batterie à pleine échelle, à la tension de référence  $u_{b-ref}$  du bus DC traduisant le comportement de la batterie à échelle réduite. Un coefficient d'adaptation  $k_{i-bat}$  permet de passer du courant mesuré  $i_{b-mes}$  au courant  $i_{b-HP}$  imposé au modèle de la batterie. Cela s'exprime par la relation (IV-2).

$$\begin{cases} i_{p-ref} = \frac{i_{p-HP}}{k_{i-prop}} \\ u_{bp-HP} = k_{u-prop} u_{b-mes} \end{cases} \quad (IV-1)$$

$$\begin{cases} u_{b-ref} = \frac{u_{b-HP}}{k_{u-bat}} \\ i_{b-HP} = k_{i-bat} i_{b-mes} \end{cases} \quad (IV-2)$$

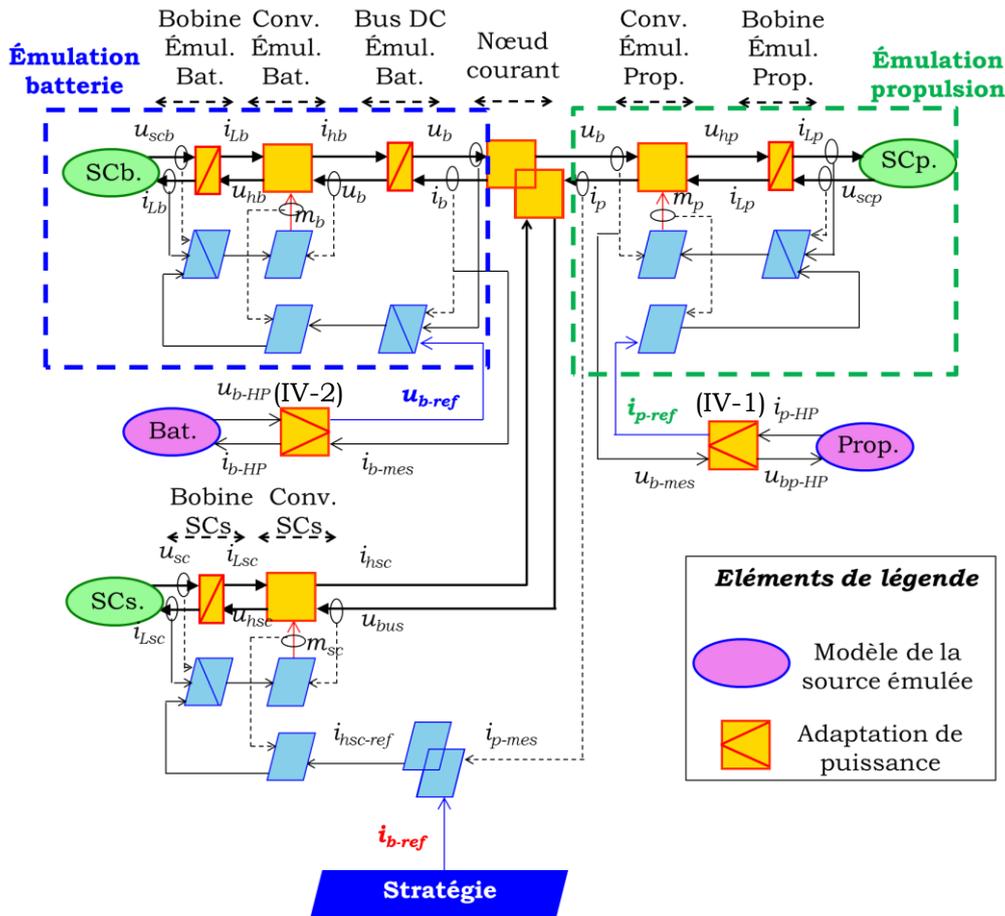


Figure IV-6 : REM et structure de commande du système expérimental

## IV.2.2 Comparaison avec une stratégie à base de règles

### IV.2.2.1 Principe de l'étude

La stratégie de gestion d'énergie proposée Chapitre II est comparée avec une stratégie à base de règles, le filtrage.

### IV.2.2.2 Stratégie de filtrage

Le filtrage consiste à séparer le courant du système de propulsion entre les dynamiques « lentes » et les dynamiques « rapides ». Cela se fait par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas (cf. § I.3.2). Le courant de référence de la batterie  $i_{b-ref}$  est déterminé de manière à imposer les fréquences basses du courant de propulsion à la batterie, tandis que les hautes fréquences sont fournies par les SCs. Par ailleurs, dans la stratégie imposée sur le système, le courant  $i_{b-ref}$  est adapté dans le but de réduire progressivement le courant du banc de SCs lorsque sa tension tend à atteindre sa valeur maximale  $u_{sc-M}$  ou sa valeur minimale  $u_{sc-m}$  (transition douce, inspiré de [Allègre 2010b]). Le processus s'amorce quand la tension des SCs atteint des niveaux intermédiaires,  $u_{sc-M1}$  en charge ( $u_{sc-M1} < u_{sc-M}$ ) et  $u_{sc-m1}$  en décharge ( $u_{sc-m1} > u_{sc-m}$ ). Le courant de référence de la batterie s'exprime par la relation (IV-3) avec  $i_{b-ref/filt}$  le courant à la sortie du filtre passe-bas. Lorsque que la tension des SCs est en limitation alors  $k_{lim}=1$  et  $i_{b-ref}=i_p$ . Une illustration de la procédure est donnée Figure IV-7. Le

basculement du mode de limitation en charge ou en décharge des SCs, se fait par l'intermédiaire du signe du courant de référence  $i_{hsc-ref/filt}$  du convertisseur des SCs, imposé dans le cas « normal » (sans limitations).

$$i_{b-ref} = k_{lim} i_{p-mes} + (1 - k_{lim}) i_{b-ref/filt} \quad \text{avec } k_{lim} \in [0,1] \quad (IV-3)$$

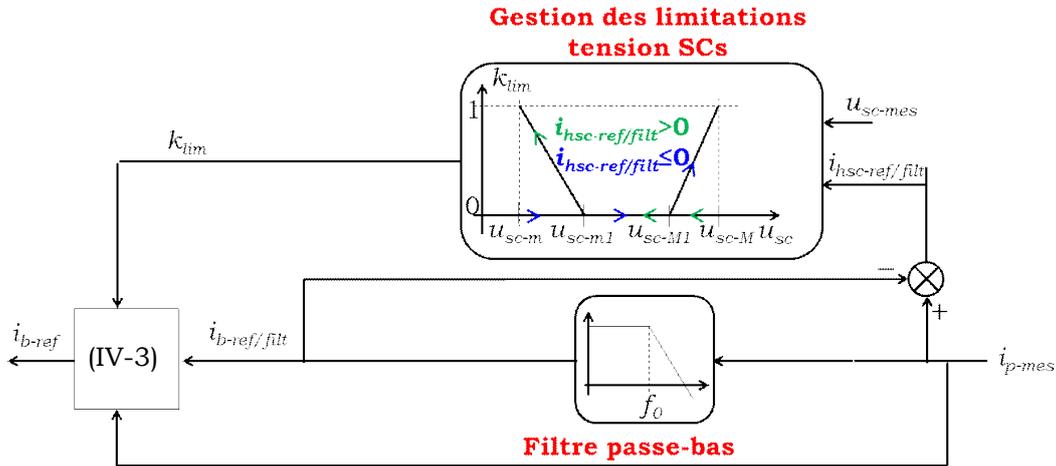


Figure IV-7 : structure de la stratégie de filtrage implantée

### IV.2.2.3 Condition des essais

Les stratégies sont comparées par rapport à leur capacité à minimiser le critère de performances. Le critère de performances retenu ici est la valeur efficace du courant de la batterie  $i_b$  (liée à la durée de vie de la batterie), la démarche restant valable en cas de changement de critère. En ce qui concerne la stratégie à base d'optimisation ( $\lambda$ -control), la valeur initiale du multiplicateur de Lagrange ( $\lambda_0$ ), est déterminée itérativement, par simulation du modèle du système expérimental (avec la commande associée), afin de respecter la condition de « charge sustaining » sur la tension des SCs. La détermination des paramètres initiaux du filtrage (fréquence de coupure  $f_0$ , constante de temps  $\tau_0$ ) est réalisée itérativement, par simulation des modèle des systèmes associés (pleine échelle et expérimental) avec leurs commandes, afin de minimiser le critère de performances. Les paramètres retenus sont ceux conduisant à la plus faible valeur de la valeur efficace du courant de la batterie. Les paramètres des stratégies sont déterminés par simulation sur le cycle de référence (WLTC classe 2). Les essais sont réalisés avec une échelle réduite de  $1/15^e$  en puissance et une pleine échelle au niveau de la tension de la batterie. Ces échelles sont prises en compte par l'intermédiaire des blocs d'adaptation de puissance et les coefficients associés. Les paramètres du système expérimental sont donnés Tableau IV-2. Les différents éléments sont illustrés Figure IV-8. Les ordres de commandes à envoyer aux convertisseurs, ainsi que les différentes mesures sont gérés par l'intermédiaire d'une carte dSPACE de type 1005. Les ordres de commande des convertisseurs sont générés par l'intermédiaire d'une Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) qui s'effectue avec une fréquence de 15 kHz.

Tableau IV-2 : paramètres du système

	<b>Système à pleine échelle</b>	<b>Système à échelle réduite</b>
<b>Batterie</b>	80 V, 12,8 kWh $R_b \in [7,2 \text{ m}\Omega; 9,4 \text{ m}\Omega]$ $i_{bm} = -480 \text{ A}$ (charge) $i_{bM} = 480 \text{ A}$ (décharge)	Echelle 1/15
<b>Véhicule</b>	594 kg	Echelle 1/15
<b>Bobine de lissage</b>	$r_L = 10 \text{ m}\Omega$ , $L = 0,2 \text{ mH}$	$r_L = 260 \text{ m}\Omega$ , $L = 0,86 \text{ mH}$
<b>Banc de SCs</b>	45 V, $R_{sc} = 3,8 \text{ m}\Omega$ $C_{sc} = 290 \text{ F}$ $u_{sc-M} = 45 \text{ V}$ , 290 F $u_{sc-m} = 0,65 u_{sc-M}$ $u_{SC0} = 0,9 u_{sc-M}$	45 V, $R_{sc} = 57 \text{ m}\Omega$ $C_{sc} = 19 \text{ F}$ $u_{sc-M} = 45 \text{ V}$ , 19 F $u_{sc-m} = 0,65 u_{sc-M}$ $u_{SC0} = 0,9 u_{sc-M}$
$f_o \mid \tau_o$	45 mHz   22 s	30 mHz   33 s
$\lambda_o$	-0,916	-0,07

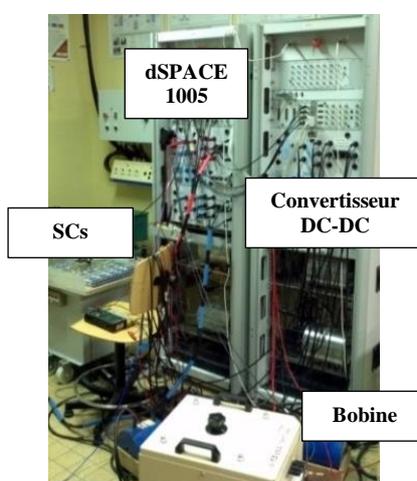


Figure IV-8 : système expérimental

#### IV.2.2.4 Tests sur le cycle de référence

Les tests relatifs au cycle de référence (WLTC classe 2) sont présentés par la suite. Les essais sont réalisés avec une échelle réduite de 1/15<sup>e</sup> en puissance. Une pleine échelle est conservée au niveau de la tension de la batterie et de celle de la propulsion. Le courant de la batterie et celui de la propulsion sont à l'échelle 1/15<sup>e</sup>. Le courant de la batterie est représenté dans le cas des deux stratégies (Figure IV-10). La stratégie à base d'optimisation vise à imposer une valeur constante du courant de la batterie. Des fluctuations sont imposées afin de faire face aux limitations de la tension des SCs (Figure IV-11.a). La stratégie de filtrage permet d'obtenir un courant de la batterie globalement lissé par rapport au courant du système de propulsion (Figure IV-9). Certains pics de courants peuvent apparaître. Cela correspond aux phases de transition douce dans lesquelles la batterie va palier aux limitations de la tension des SCs (Figure IV-11.b). En ce qui concerne le critère de performances, une analyse est faite dans la partie suivante. A noter que la condition de « charge sustaining » pour la tension des SCs, n'est pas complètement respectée pour les deux stratégies. Le paramètre  $\lambda_o$  de la stratégie du  $\lambda$ -control a été déterminé pour respecter cette condition de « charge sustaining », à partir de la simulation du modèle du système

expérimental. Le non-respect de cette condition est dû en partie aux écarts entre le modèle simulé et le système réel.

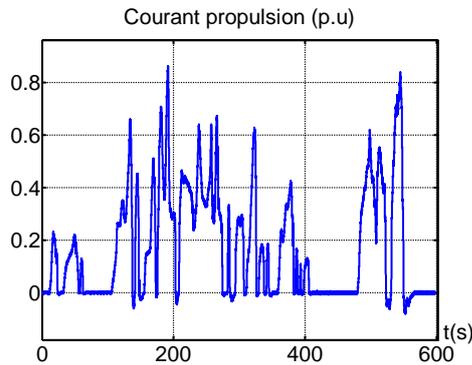


Figure IV-9 : WLTC, courant du système de propulsion

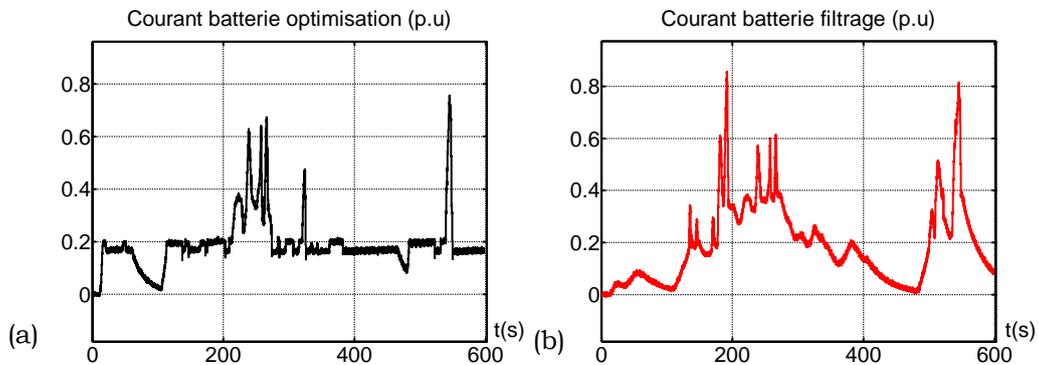


Figure IV-10 : WLTC, courant de la batterie et du système de propulsion (a) optimisation, (b) filtrage

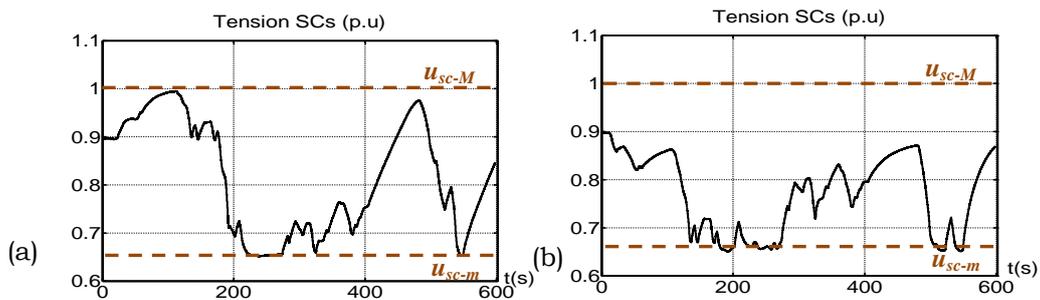


Figure IV-11 : WLTC, tension des SCs, (a) optimisation, (b) filtrage

#### IV.2.2.5 Tests sur des cycles de conduite réels

##### Cycles utilisés

Des tests sont effectués sur deux autres cycles. Les paramètres des stratégies utilisés pour le cycle WLTC classe 2 sont conservés ( $f_0$  et  $\lambda_0$ ). Cela permet d'évaluer les performances des deux stratégies dans le cas de cycles de conduite non connus *a priori*. De plus, le respect des contraintes liées à l'application temps réel, notamment les limitations de la tension des SCs doivent être assurées, et ce, pour tout type de condition de conduite. Les deux cycles

réels proviennent de tests de la Tazzari Zéro du L2EP effectués sur route (véhicule instrumenté). Les caractéristiques des cycles sont différentes (cf. Tableau IV-3). Le WLTC et le cycle « Réel 1 » ont des caractéristiques similaires en termes d'énergie requise par le système de propulsion. Le cycle « Réel 2 » s'avère être le cycle le plus « dynamique ». Les deux cycles réels utilisés sont représentés Figure IV-12.

Tableau IV-3 : caractéristiques des différents cycles de conduite

	WLTC	Réel 1	Réel 2
<b>Energie requise (kWh)</b>	0,45	0,37	0,77
<b>Accélération maximale (m/s<sup>2</sup>)</b>	1,2	2	3,8
<b>Décélération maximale (m/s<sup>2</sup>)</b>	-1,4	-2,6	-4,4

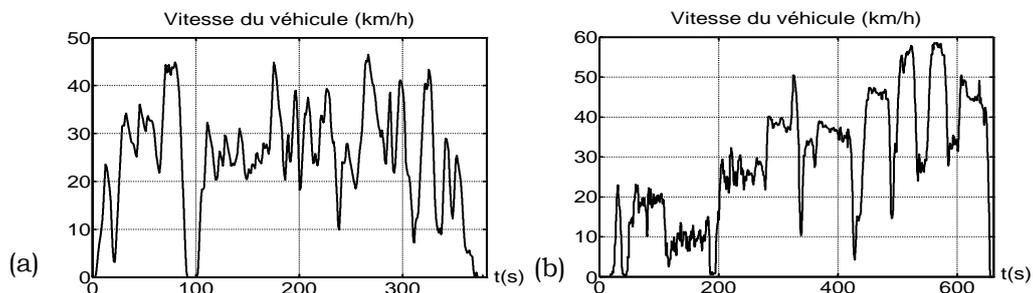


Figure IV-12 : cycles réel, (a) Réel 1, (b) Réel 2

## Résultats et discussion

Le courant de propulsion est représenté pour les cycles « Réel 1 » et « Réel 2 » (Figure IV-13). En ce qui concerne les sollicitations de la batterie sur le cycle « Réel 1 » (Figure IV-14.a, Figure IV-14.b), et sur le cycle « Réel 2 » (Figure IV-15.a, Figure IV-15.b), les deux stratégies permettent de réduire les pics de courant imposés à la batterie. Comme les paramètres des stratégies ne sont pas adaptés aux cycles réels, les limitations de la tension des SCs surviennent de manière plus fréquente que dans le cas du cycle de référence (WLTC) (Figure IV-16.a, Figure IV-16.b). Les phases de recharge à l'arrêt quasi-inexistantes ne permettent pas aux SCs de se recharger. La tension des SCs est de ce fait souvent proche de sa limite basse. Les limitations de la tension des SCs conduisent à des pics du courant de la batterie. Par conséquent, il est clair que la limitation de la tension des SCs affecte les performances des stratégies. La valeur efficace du courant de la batterie sur les trois cycles est représentée Figure IV-18. La stratégie du  $\lambda$ -control est la plus efficace sur le cycle de référence (WLTC classe 2). En effet, la valeur efficace du courant de la batterie est réduite de 14 % par rapport à la stratégie de filtrage. La différence entre les stratégies au niveau du critère de performances décroît avec les cycles réels. La valeur efficace du courant de la batterie dans le cas de l'optimisation est réduite de 2 % par rapport à la stratégie de filtrage. Bien que le  $\lambda$ -control s'avère être la stratégie la plus performante sur le cycle de référence, les deux stratégies sont équivalentes sur les cycles réels. Un autre point essentiel est que le  $\lambda$ -control répond pleinement aux contraintes liées à l'application temps réel. En effet, la stratégie est applicable en temps et la sécurité du système (limitation de la tension des SCs) est assurée pour tous les cycles de conduite imposés.

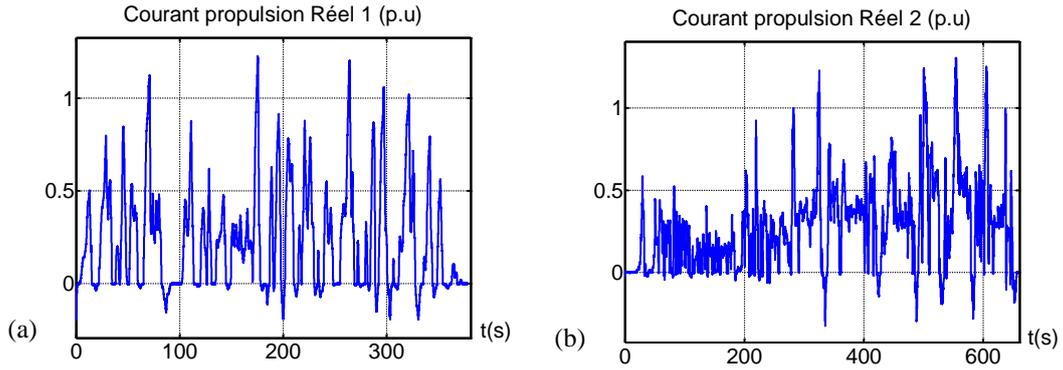


Figure IV-13 : courant du système de propulsion, (a) Réel 1, (b) Réel 2

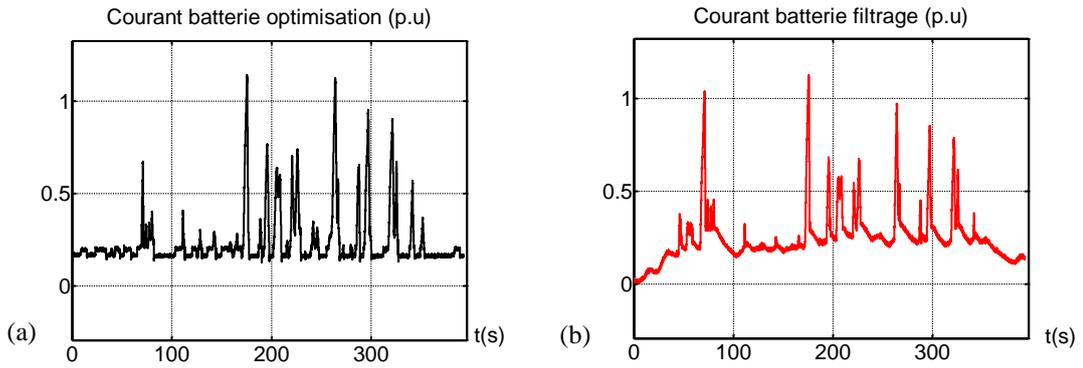


Figure IV-14: courant de la batterie sur le « Réel 1 », (a) optimisation, (c) filtrage

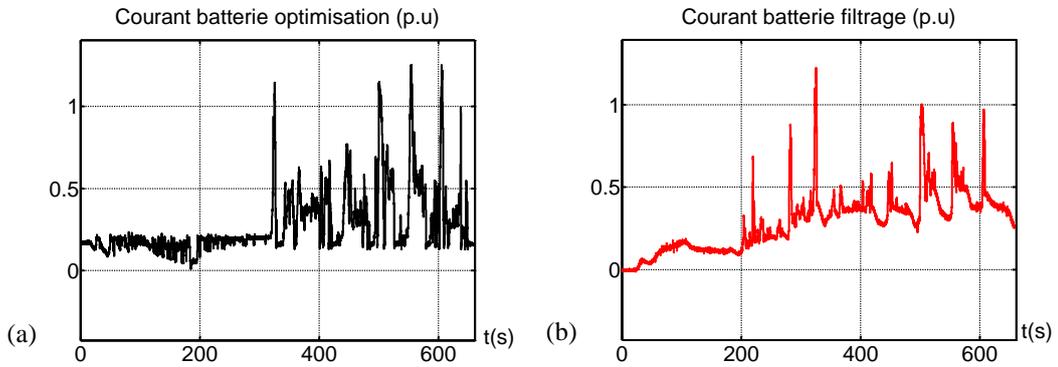


Figure IV-15 : courant de la batterie sur le « Réel 2 », (a) optimisation, (c) filtrage

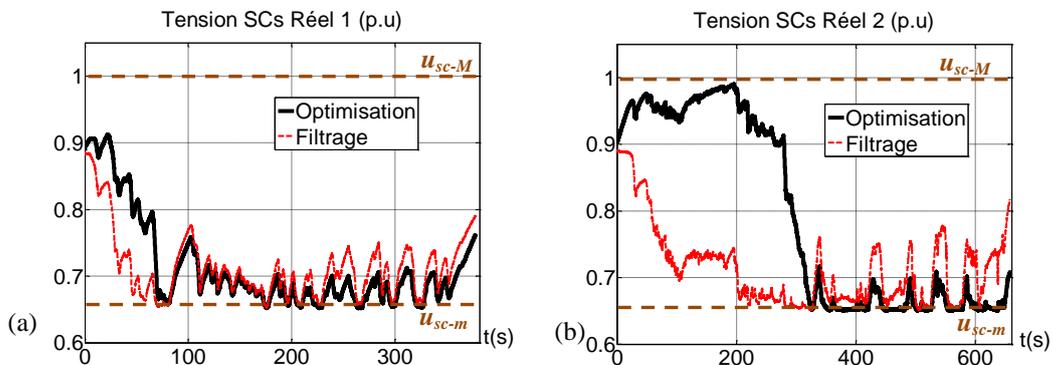


Figure IV-16 : tension SCs, (a) Réel 1, (b) Réel 2

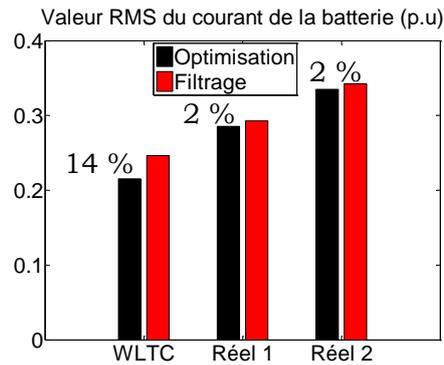


Figure IV-17 : valeur efficace du courant de la batterie sur les trois cycles de conduite

## IV.3 Cas du véhicule PàC-batterie-SCs

Le véhicule PàC-batterie-SCs étudié Chapitre III est émulé dans cette partie afin de valider les stratégies développées.

### IV.3.1 Emulation du véhicule

#### IV.3.1.1 Architecture du système

Le système étudié se compose de la batterie et des SCs avec leurs convertisseurs DC-DC associés (avec les bobines de lissage), du système de propulsion et de la PàC et du convertisseur DC-DC associé (Figure IV-18.a).

L'objectif de la simulation HIL est de tester la répartition des flux d'énergie entre les sources. Cette répartition s'effectue au niveau du bus DC. Le banc de SCs avec son convertisseur DC-DC associé ainsi que la PàC (avec le convertisseur associé) sont conservés. Une interface est définie afin d'émuler l'ensemble composé de la batterie et du convertisseur DC-DC associée (avec la bobine de lissage) et le système de propulsion (Figure IV-18.b).

Le système de propulsion est émulé de la même manière que celle présentée dans le paragraphe précédent (cas du véhicule batterie-SCs). C'est-à-dire par l'intermédiaire d'un banc de SCs associé à un convertisseur DC-DC (avec une bobine de lissage).

L'ensemble constitué de la batterie, du convertisseur DC-DC associé et de la bobine de lissage est émulé par l'intermédiaire d'un banc de SCs associé à un convertisseur DC-DC (avec une bobine de lissage).

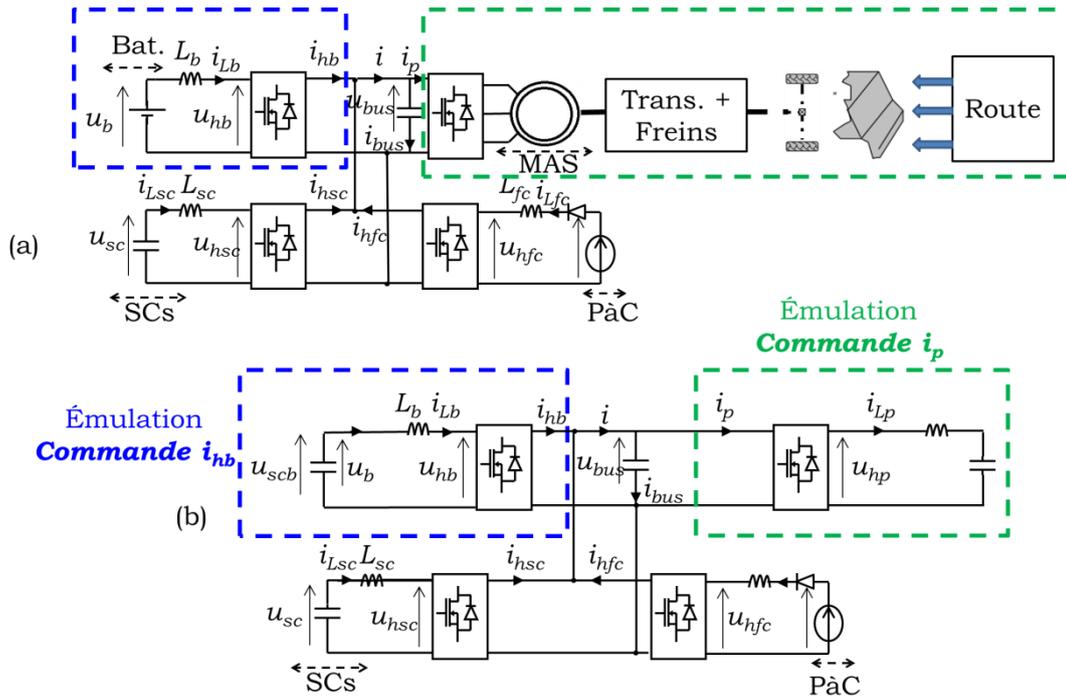


Figure IV-18 : architecture du système, (a) système réel, (b) système expérimental

### IV.3.1.2 Commande du système

La REM et la structure de commande du système étudié sont données Figure IV-19. La REM et la structure de commande de l'émulation de l'ensemble batterie/bobine de lissage/convertisseur DC-DC (« Sce bat ») sont données Figure IV-20.a. Le courant de référence du convertisseur DC-DC du système expérimental (émulateur), est imposé à partir de la simulation des modèles de la batterie, de la bobine de lissage et du convertisseur DC-DC du véhicule réel (blocs magenta). Un coefficient d'adaptation  $k_{i-Sbat}$  permet de passer du courant de référence du convertisseur  $i_{hb-ref}$  imposé par la stratégie, à son équivalent à pleine échelle  $i_{hb-ref-HP}$ . Ce même coefficient permet de passer du courant du convertisseur de la batterie, provenant du modèle à pleine échelle de l'ensemble  $i_{hb-HP}$ , au courant imposé au convertisseur du système expérimental  $i_{hb-BP}$ . Un second coefficient d'adaptation de puissance  $k_{u-Sbat}$  permet de passer de la tension du bus DC  $u_{bus-mes}$  mesurée sur le système expérimental, à la tension  $u_{bus-HP}$  imposée au modèle de l'ensemble. Les relations correspondantes s'expriment par (IV-4).

La REM et la structure de commande du système de propulsion sont données Figure IV-20.b. Celui-ci est émulé de manière identique à celle présentée dans le § précédent (cas du véhicule batterie-SCs).

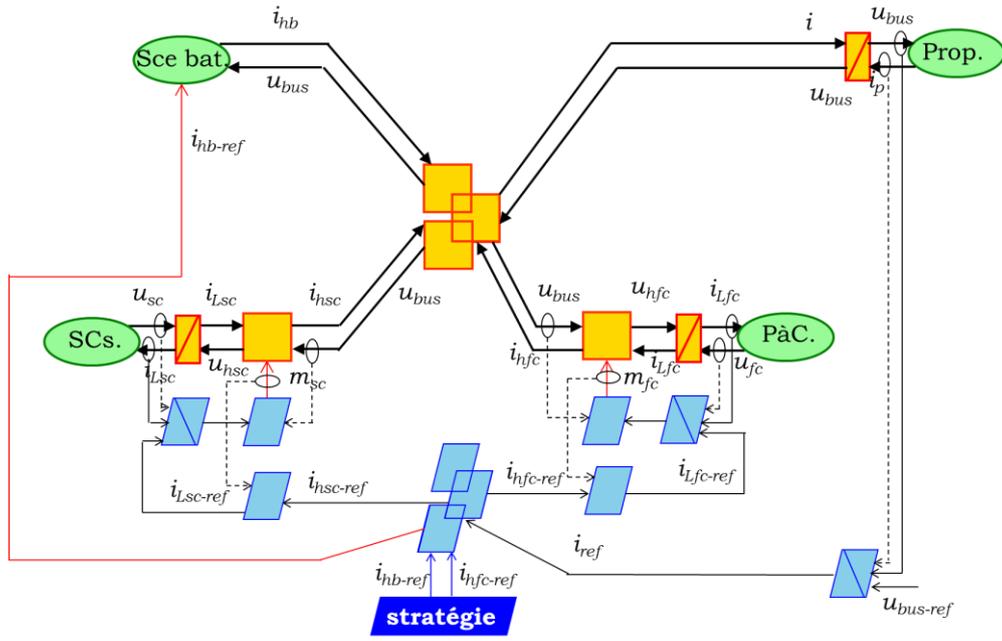


Figure IV-19 : REM et structure de commande du système étudié

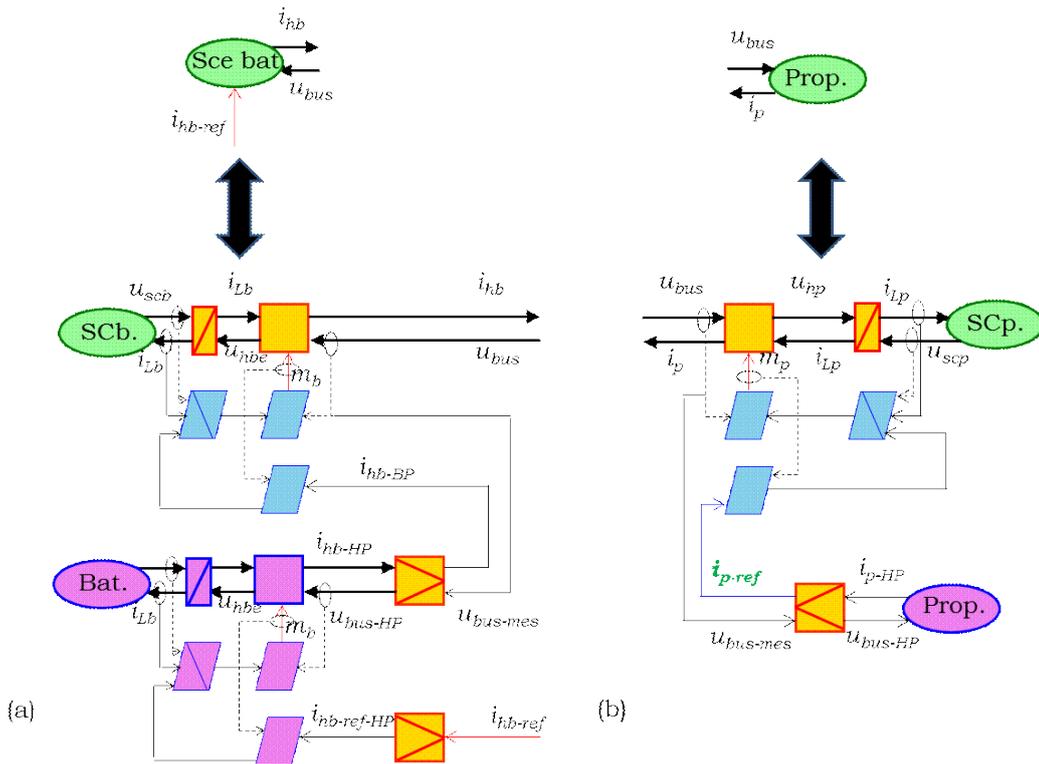


Figure IV-20 : REM et structure de commande des parties émülées, (a) batterie/convertisseur DC-DC, (b) propulsion

$$\begin{cases} i_{hb-BP} = \frac{i_{hb-HP}}{k_{i-Sbat}} \\ i_{hb-ref-HP} = i_{hb-ref} k_{i-Sbat} \\ u_{bus-HP} = k_{u-Sbat} u_{bus} \end{cases} \quad (IV-4)$$

### IV.3.2 Comparaison des stratégies de commande

Les stratégies à base d'optimisation développées dans le cas du véhicule PàC batterie-SCs (cf. Chapitre III) sont comparées à une stratégie de filtrage.

#### IV.3.2.1 Stratégie de filtrage utilisée

La stratégie de filtrage utilisée consiste à imposer une part des dynamiques du courant du système de propulsion à chaque source du système d'alimentation du véhicule. Des stratégies basées sur le filtrage ont été utilisées pour des véhicules PàC-batterie-SCs avec une validation expérimentale des stratégies dans de précédents travaux [Thounthong 2009b], [Azib 2014]. Trois gammes de fréquences sont distinguées, les « basses » fréquences sont imposées à la PàC, les « moyennes » fréquences sont imposées à la batterie, les SCs fournissent les dynamiques restantes du courant du système de propulsion (Figure IV-21). Par ailleurs, les limitations de la tension des SCs sont prises en compte dans la stratégie implantée. C'est le même principe que celui présenté dans le § IV.2. Les phases de limitation de la tension des SCs sont assurées par la batterie. Le courant de référence  $i_{hb-ref}$  de la batterie est adapté dans le but de réduire progressivement le courant du banc de SCs lorsque sa tension tend à atteindre sa valeur maximale  $u_{sc-M}$  ou sa valeur minimale  $u_{sc-m}$ . Le courant de référence  $i_{hb-ref}$  s'exprime par (IV-5) avec  $i_{hb-ref/norm}$  sa valeur en conditions de fonctionnement « normal » (pas de limitation de la tension des SCs). Le synoptique de la stratégie de filtrage implantée est donné Figure IV-22. Si les SCs sont en limitation,  $k_{lim}$  vaut 1 et le courant  $i_{hb-ref}$  est égale à la différence entre le courant de référence du bus DC  $i_{ref}$  et le courant de référence  $i_{hfc-ref}$  du convertisseur de la PàC. A noter qu'il existe d'autres manières de gérer les limitations de la tension des SCs. Une méthode consiste notamment à asservir la tension des SCs [Thounthong 2009b], [Azib 2014].

$$i_{hb-ref} = i_{hb-ref/norm} + k_{lim}(i_{ref} - i_{hfc-ref} - i_{hb-ref/norm}) \text{ avec } k_{lim} \in [0,1] \quad (IV-5)$$

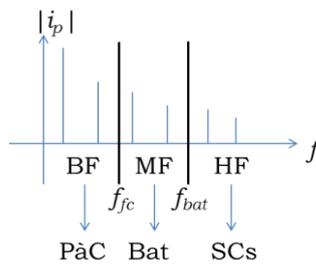


Figure IV-21 : répartition fréquentielle du courant du système de propulsion

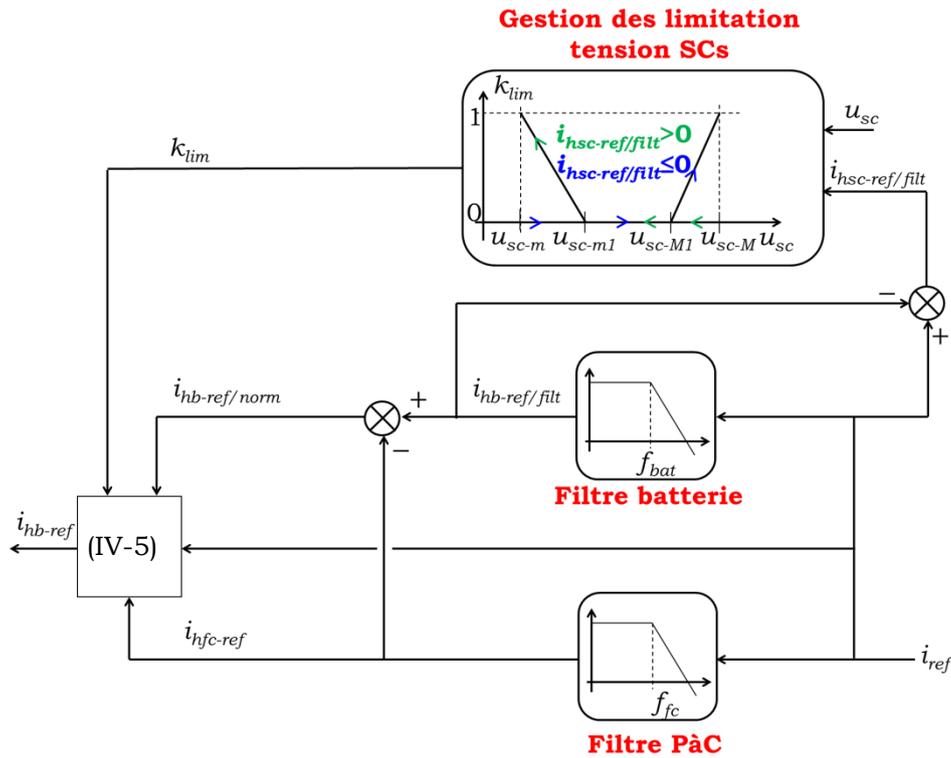


Figure IV-22 : synoptique de la stratégie de filtrage

#### IV.3.2.2 Condition des essais

Les stratégies à base d'optimisation développées pour le véhicule PàC-batterie SCs (approche globale, approche décomposée, cf. Chapitre III), sont comparées au filtrage.

Les facteurs d'équivalences initiaux sont déterminés par la simulation du modèle expérimental de la manière présentée Chapitre III (itérations dans le but de respecter les conditions de charge sustaining). Ces paramètres sont déterminés sur le cycle de conduite de référence (WLTC classe 2). Les valeurs des fréquences de coupure ( $f_{bat}$  et  $f_{fc}$ ) de la stratégie de filtrage sont issues de la littérature [Thounthong 2009b], [Azib 2014]. Ces valeurs traduisent des limitations dynamiques (en termes de réponse en puissance) d'une batterie et d'une PàC à imposer afin de limiter leur dégradation. Les paramètres correspondant aux essais sont donnés Tableau IV-4.

Les contraintes expérimentales imposent que la puissance de l'ensemble soit réduite à une échelle  $1/40^e$  par rapport à celle du système à pleine échelle. Une pleine échelle est conservée au niveau de la tension de l'ensemble batterie/convertisseur DC-DC/bobine de lissage et de celle du système de propulsion. Le courant de l'ensemble batterie/convertisseur DC-DC/bobine de lissage et celui de la propulsion sont à  $1/40^e$ .

Les bornes maximale et minimale de la tension des SCs sont ajustées afin que le banc de SCs soit énergétiquement équivalent à un banc de SCs à une échelle réduite de  $1/40^e$  par rapport aux SCs du système à pleine échelle. Ceci est fait dans le but de reproduire le comportement des SCs (limitations en tension notamment). A noter que les modules du banc de SCs de la plateforme sont du même type que ceux du système à pleine échelle (cf. Tableau IV-4). En considérant  $u_{1sc-M}$  la tension maximale d'un module de SCs, l'énergie

maximale  $E_{sc-M}$  (emmagasinée ou délivrée) aux bornes du banc de SCs à pleine échelle, est définie par (IV-6) avec  $C_{1sc}$  la capacité d'un module,  $d_{sc}$  le ratio entre la tension minimale et la tension maximale d'un SC, et  $N_{sc}$  le nombre de modules du banc à pleine échelle. L'énergie  $E_{sc-M/bp}$  désirée pour le banc de SCs de la plateforme est définie par (IV-7), avec  $u_{1sc-m/bp}$  la tension minimale (désirée) d'un SC de la plateforme et  $N_{sc/bp}$  le nombre de modules du banc de SCs de la plateforme. La tension  $u_{1sc-m/bp}$  est finalement définie par (IV-8).

$$E_{sc-M} = \frac{1}{2} N_{sc} C_{1sc} u_{1sc-M}^2 (1 - d_{sc}^2) \quad (IV-6)$$

$$E_{sc-M/bp} = \frac{1}{2} N_{sc/bp} C_{1sc} (u_{1sc-M}^2 - u_{1sc-m/bp}^2) \quad (IV-7)$$

$$\begin{cases} E_{sc-M/bp} = \frac{E_{sc-M}}{40} \\ u_{1sc-m/bp} = u_{1sc-M} \sqrt{1 - \frac{N_{sc}(1 - d_{sc}^2)}{40N_{sc/bp}}} \end{cases} \quad (IV-8)$$

La puissance maximale du stack de la PàC disponible sur la plateforme est de 1,2 kW (cf. Tableau IV-4). Cela correspond à une échelle réduite de 1/17<sup>e</sup> (en puissance) par rapport au stack de la PàC du système à pleine échelle. La PàC de la plateforme est par conséquent surdimensionnée par rapport au système à échelle réduite (1/40<sup>e</sup> en puissance par rapport au système à pleine échelle). Cependant, l'objectif ici est de valider la répartition des flux d'énergie entre les différentes sources en temps réel. Le système est commandé par l'intermédiaire d'une carte dSPACE de type 1103. La MLI s'effectue avec une fréquence de 5 kHz. Des appareillages du système expérimental sont représentés Figure IV-23.

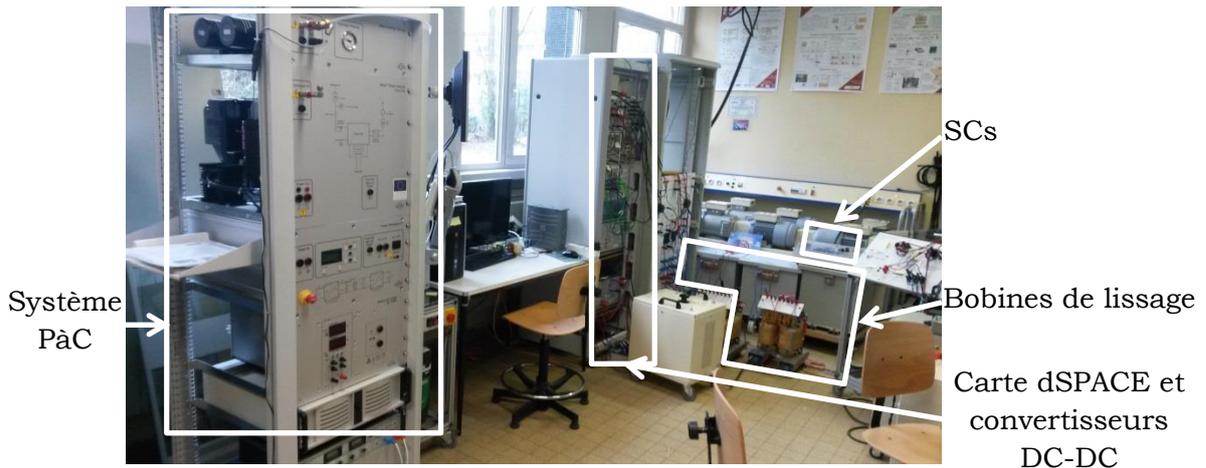


Figure IV-23 : émulation du véhicule PàC-batterie-SCs

Tableau IV-4 : paramètres du véhicule PàC-batterie-SCs

	<b>Système à pleine échelle</b>	<b>Système à échelle réduite</b>
<b>Stack PàC</b>	Type : PEMFC Puissance maximale : 20 kW Plage de tension : 50-80 V Courant maximal : 360 A	Type : PEMFC Puissance maximale : 1,2 kW Plage de tension : 28-43 V Courant maximal : 45 A
<b>Véhicule</b>	640 kg	Echelle 1/40
<b>Bobines de lissage</b>	$r_L=10 \text{ m}\Omega$ , $L=0.2 \text{ mH}$	SCs : $r_L=850 \text{ m}\Omega$   $L=24 \text{ mH}$ PàC: $r_L=850 \text{ m}\Omega$   $L=24 \text{ mH}$ Batterie : $r_L=922 \text{ m}\Omega$   $L=213 \text{ mH}$
<b>Banc de SCs</b>	45 V   $R_{sc}=3,8 \text{ m}\Omega$   $C_{sc}=290 \text{ F}$ $u_{sc-M}=45 \text{ V}$   $u_{sc-m}=0,65u_{sc-M}$ $u_{SC0}=0,9u_{sc-M}$	45 V   $R_{sc}=57 \text{ m}\Omega$   $C_{sc}=19 \text{ F}$ $u_{sc-M}=44 \text{ V}$   $u_{sc-m}=38 \text{ V}$ $u_{SC0}=42,5 \text{ V}$
<b>Filtrage</b>		$f_{jc}=50 \text{ mHz}$   $t_{jc}=25 \text{ s}$ $f_{bat}=200 \text{ mHz}$   $t_{bat}=5 \text{ s}$
<b>Optimisation (globale)</b>	$s_{sc}=-1,6211$   $s_b=-1,624$ $B_b=10$	$s_{sc}=-1,425$   $s_b=-1,425$ $B_b=10$
<b>Optimisation (décomposée)</b>	$s_{hess}=-1,7000$   $s_{glob}=-1,624$	$s_{hess}=-0,001$   $s_{glob}=-1,425$

#### IV.3.2.3 Tests sur le cycle de référence

Les trois stratégies, i.e (i)  $\lambda$ -control par l'approche globale (ii)  $\lambda$ -control avec sources équivalentes (ou approche décomposée) (iii) filtrage, sont testées sur le cycle de référence (WLTC classe 2). La stratégie à base d'optimisation issue de l'approche décomposée impose un courant quasi-constant au convertisseur de la PàC (Figure IV-24.a). Cela permet à celle-ci de ne pas subir les fluctuations du courant du système de propulsion. En ce qui concerne la sollicitation des sources secondaires, le courant de la batterie subit peu de variations dans le cas de l'optimisation décomposée. Le courant des SCs comporte par conséquent, des pics importants dans certains cas (Figure IV-24.d). La batterie est sollicitée essentiellement dans les phases de limitation de la tension des SCs (Figure IV-25.d).

La stratégie à base d'optimisation issue de l'approche globale permet de limiter les pics de courants au niveau du courant du convertisseur de la PàC (Figure IV-24.b). Les variations du courant de la batterie ont des amplitudes réduites mais sont plus fréquentes dans le cas de l'approche globale par rapport à l'approche décomposée (Figure IV-24.e). Les SCs fournissent des pics de courants moins importants que dans le cas de l'approche décomposée.

La stratégie de filtrage impose un courant du convertisseur de la PàC lissé par rapport au courant du système de propulsion (Figure IV-24.c). Les sollicitations des SCs et de la batterie sont plus équilibrées dans le cas du filtrage (Figure IV-24.c). Le principe du filtrage est clairement observé. Les dynamiques du courant des SCs sont plus rapides que celles du courant de la batterie.

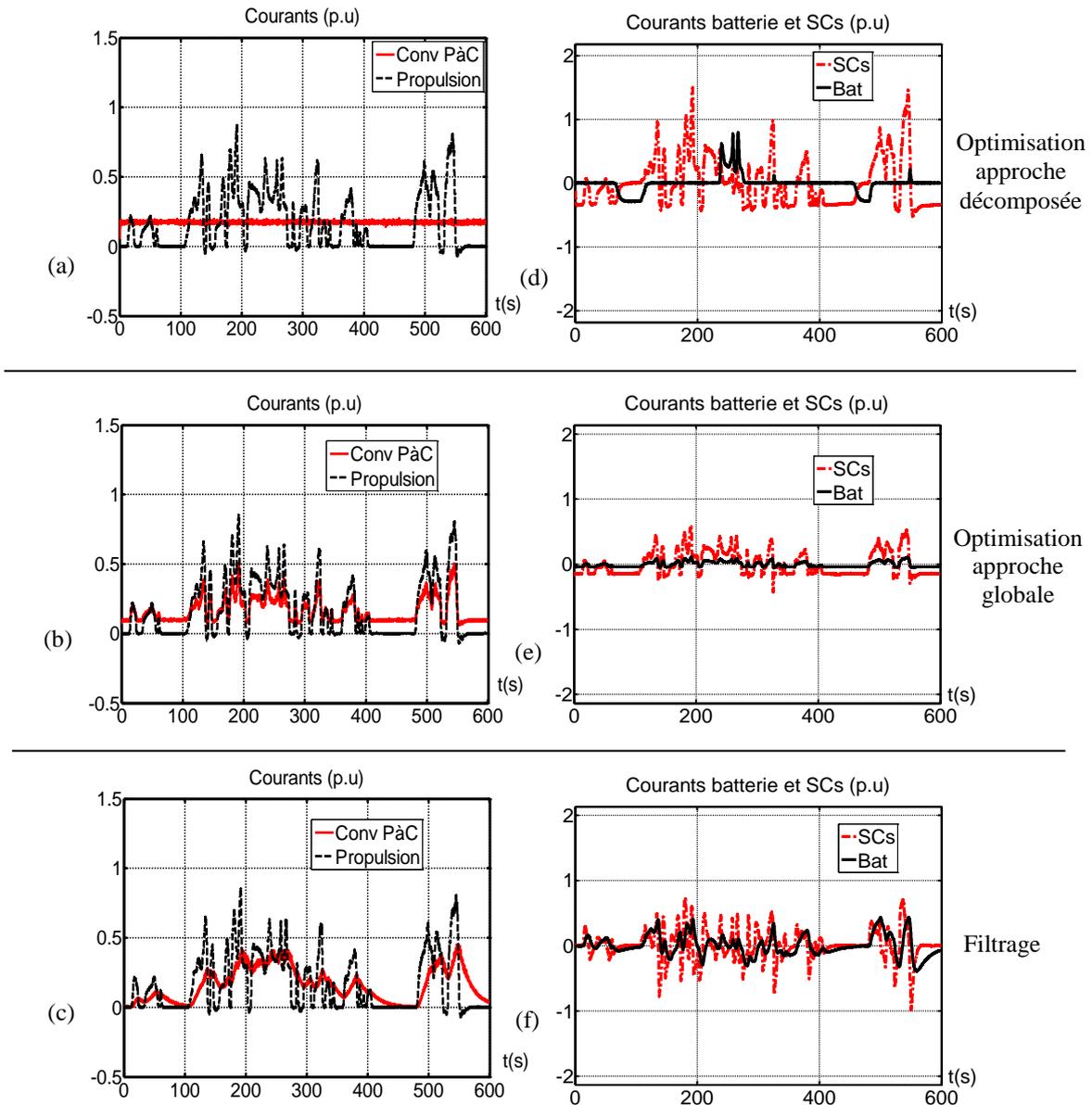


Figure IV-24 : WLTC, estimation du courant du convertisseur PàC et propulsion (a) décomposée, (b) globale, (c) filtrage | courant de la batterie et des SCs (d) décomposée, (e) globale, (f) filtrage

L'évolution de l'état de charge de la batterie traduit les différentes formes de sollicitations qui lui sont imposées. Le bilan énergétique de la batterie entre le début et la fin du cycle de conduite est globalement nul pour l'ensemble des stratégies (Figure IV-25.a, Figure IV-25.b et Figure IV-25.c). La stratégie du  $\lambda$ -control assure le maintien de la tension des SCs entre les limitations imposées dans le cas de l'approche décomposée (Figure IV-25.d). L'activation du  $\lambda$ -control n'est pas nécessaire dans le cas de l'optimisation issue de l'approche globale car la tension des SCs ne tend pas à atteindre ses limites (Figure IV-25.e). Enfin, la tension des SCs varie très peu dans le cas du filtrage (Figure IV-25.f). Une conclusion et une discussion sur les essais seront données par la suite.

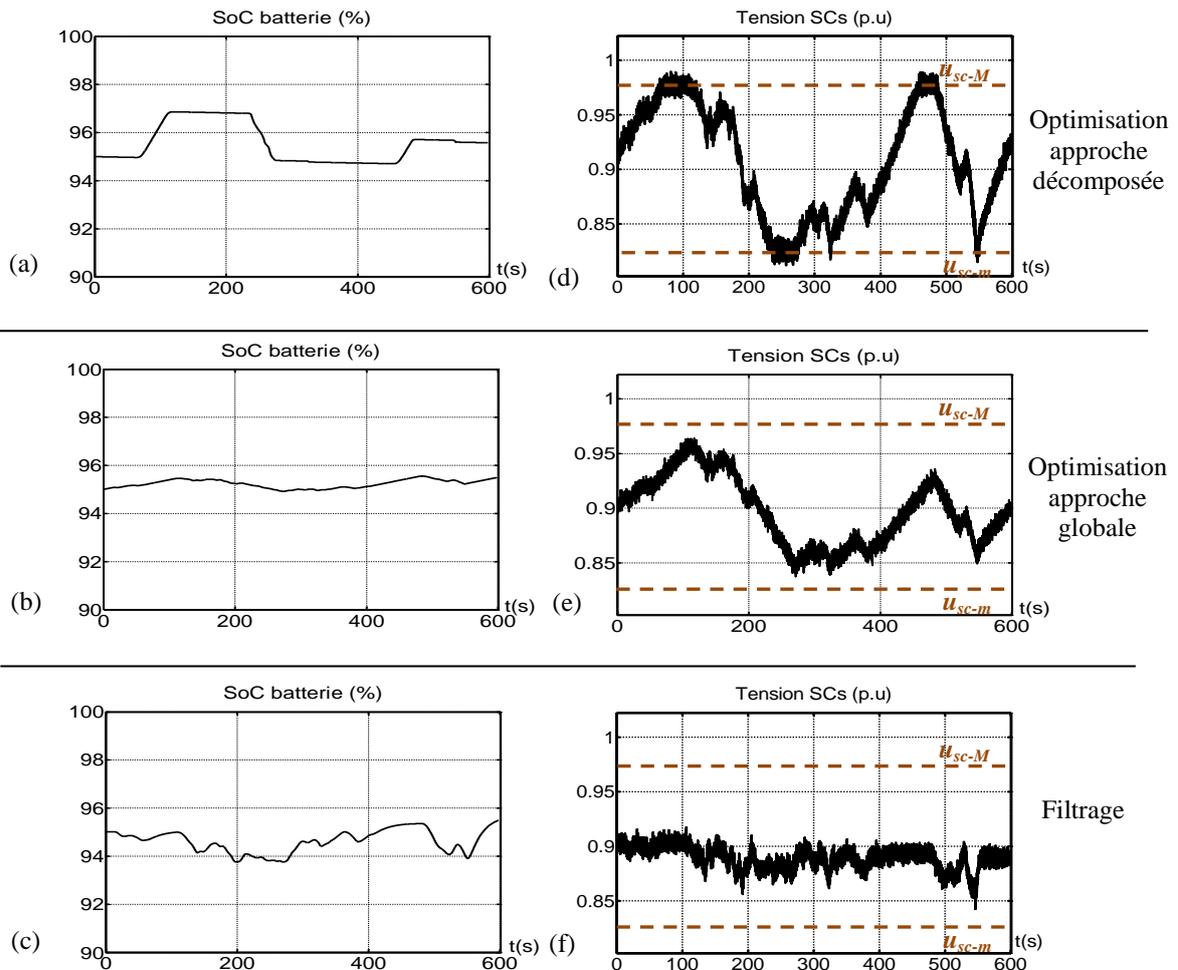


Figure IV-25 : WLTC, état de charge de la batterie, (a) décomposée, (a) globale, (c) filtrage | tension des SCs, (d) décomposée, (e) globale, (f) filtrage

#### IV.3.2.4 Tests sur un cycle réel

Des tests ont également été effectués sur le cycle « Réel 1 » (Figure IV-12.a). Les paramètres des stratégies sont conservés afin d'évaluer leurs performances dans des conditions autres que celles du cycle de référence. D'autre part, cela permet d'évaluer la capacité des stratégies à répondre aux contraintes liées à l'application en temps réel. En ce qui concerne les sollicitations de la PàC, la même tendance est observée dans le cas de l'optimisation issue de l'approche décomposée. Un courant quasi-constant est imposé au convertisseur DC-DC du système PàC (Figure IV-26.a). Le système PàC doit fournir de nombreux pics de courant dans le cas de la stratégie à base d'optimisation issue de l'approche globale (Figure IV-26.b). La stratégie de filtrage permet de lisser efficacement le courant imposé à la PàC (Figure IV-26.c). En ce qui concerne la sollicitation des sources secondaires, les tendances observées dans le cas du cycle WLTC se confirment. La batterie est utilisée de manière ponctuelle dans le cas de l'optimisation issue de l'approche décomposée (Figure IV-26.d). Cela correspond aux phases de limitation de la tension des SCs (Figure IV-27.d). La batterie est utilisée tout au long du cycle de conduite dans le cas de l'approche globale (Figure IV-26.e) mais doit fournir des pics de courant moins importants

que dans le cas de l'approche décomposée. Les caractéristiques du filtrage se retrouvent avec le courant de la batterie ayant des dynamiques moins rapides que celui des SCs (Figure IV-26.f).

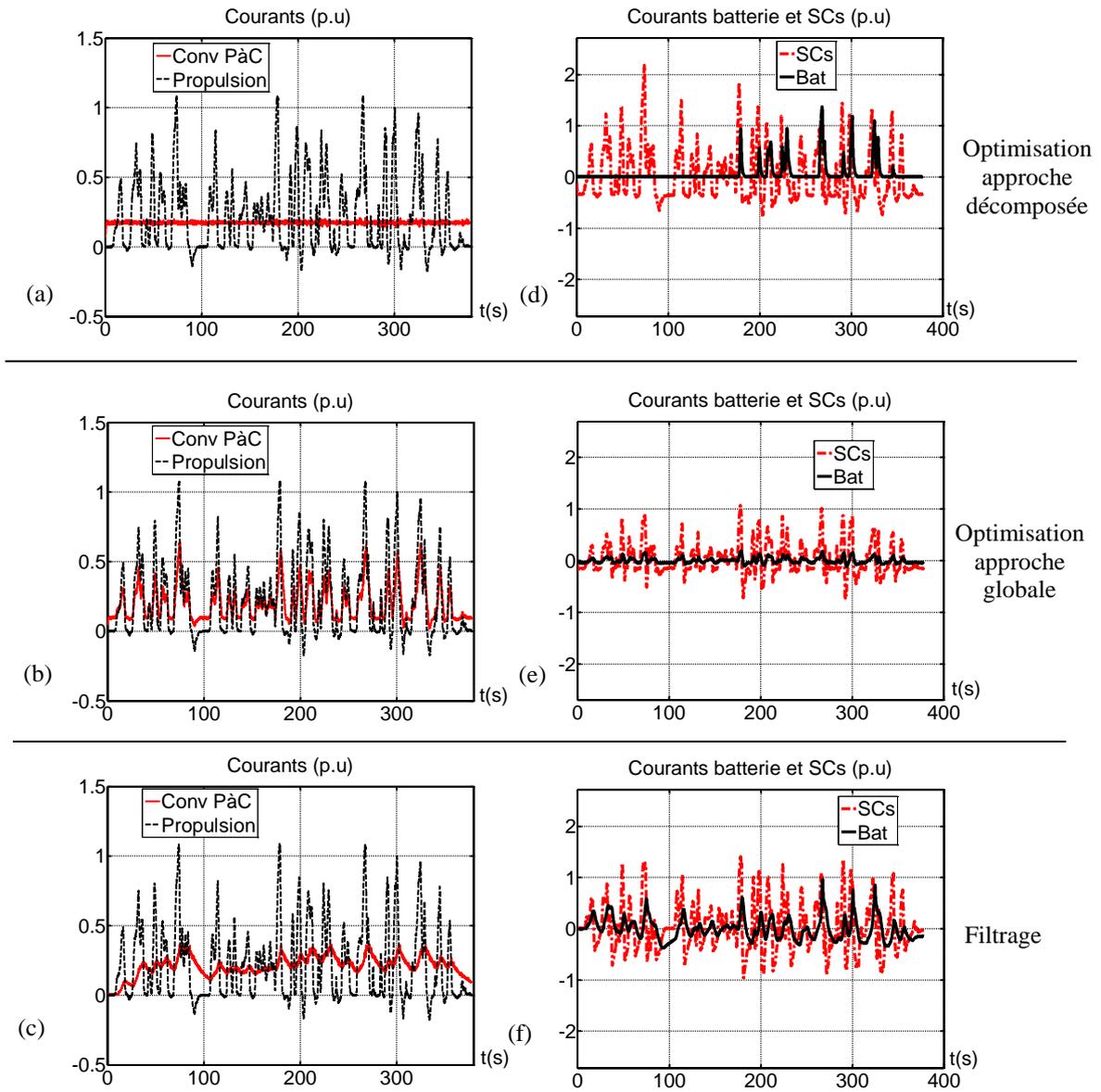


Figure IV-26 : cycle Réel 1, courant du convertisseur de la PàC et de la propulsion (a) décomposée, (b) globale, (c) filtrage | courant de la batterie et des SCs (d) décomposée, (e) globale, (f) filtrage

Au niveau de l'état de charge de la batterie, celle-ci subit une décharge entre le début et la fin du cycle dans le cas de l'optimisation issue de l'approche décomposée (Figure IV-27.a). Le bilan énergétique de la batterie tend à être globalement nul entre le début et la fin du cycle de conduite dans le cas de l'optimisation issue de l'approche globale (Figure IV-27.b) ainsi que dans le cas du filtrage (Figure IV-27.c). La tension des SCs reste proche de sa valeur minimale (imposée) dans le cas des deux approches d'optimisation (Figure IV-27.d et Figure IV-27.e). L'évolution de la tension des SCs reste très limitée dans le cas de la stratégie de filtrage (Figure IV-27.f).

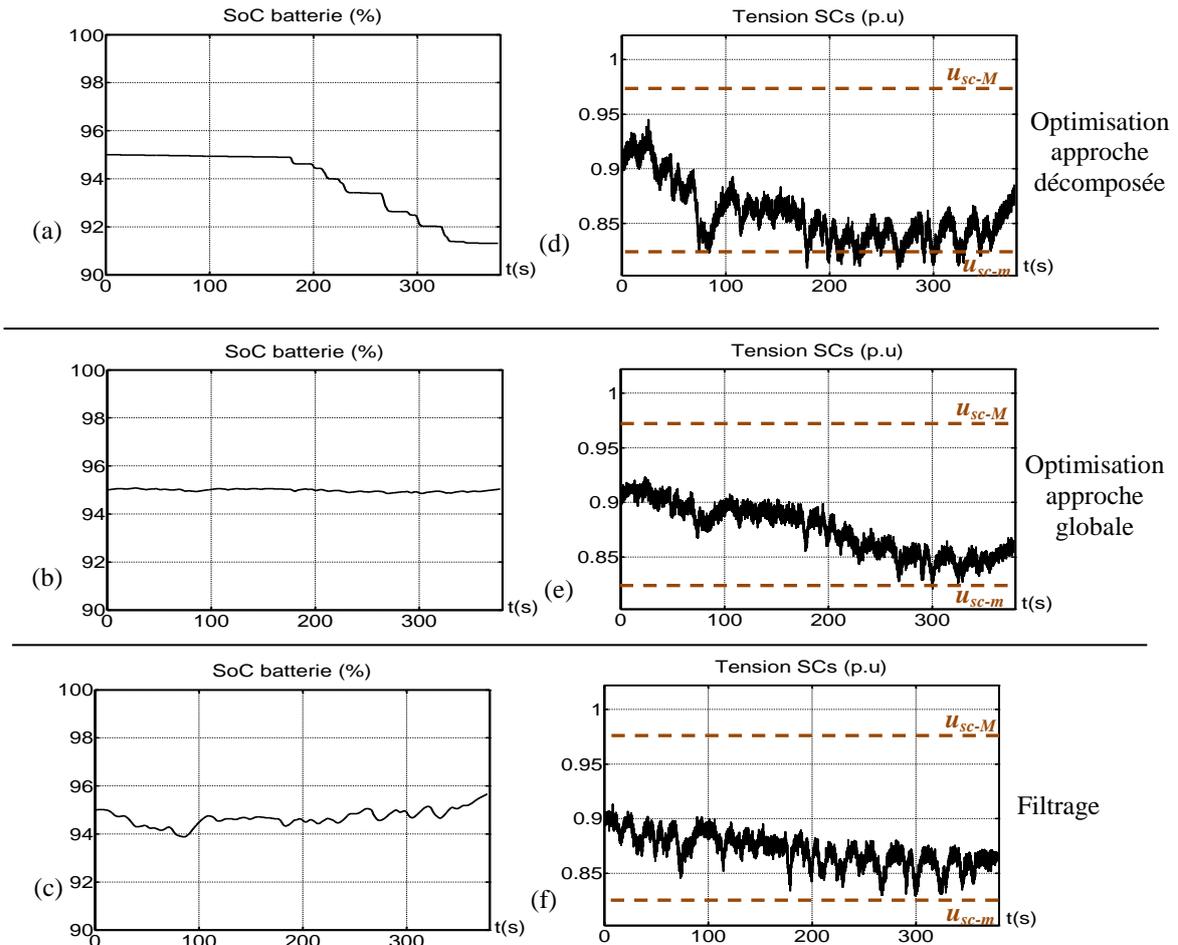


Figure IV-27 : cycle Réel 1, état de charge de la batterie, (a) décomposée, (a) globale, (c) filtrage | tension des SCs, (d) décomposée, (e) globale, (f) filtrage

#### IV.3.2.5 Discussion

Les trois stratégies sont comparées selon différents axes. Les deux premiers sont la consommation de  $H_2$  et la valeur efficace du courant de la batterie (durée de vie de la batterie). Ils correspondent au critère de performances à minimiser par les stratégies à base d'optimisation (cf. Chapitre III). Le troisième axe de comparaison est la valeur efficace du courant de la PàC. Celui-ci est introduit afin d'évaluer les sollicitations de la PàC vis-à-vis de la stratégie imposée. En effet cela est relatif à la durée de vie de la PàC.

- ✓ *Consommation de  $H_2$* : la consommation de dihydrogène de la PàC sur les deux cycles de conduite est représentée Figure IV-28.a. L'observation majeure qui peut être faite, est que les trois stratégies sont équivalentes sur cet axe de comparaison. En effet, les écarts varient entre 1 % et 2 % (cf. Tableau IV-5) Une explication peut être donnée à ce phénomène. Le rendement de la PàC varie très peu dans la plage de fonctionnement dans laquelle elle est utilisée (système surdimensionné par rapport à l'échelle de puissance). Or, les trois stratégies visent à imposer le même bilan énergétique à la PàC, celui correspondant à la puissance moyenne du système de propulsion (bilan énergétique nul du système batterie-SCs). Par conséquent, il est naturel d'observer une consommation de dihydrogène équivalente pour les deux cycles. Par ailleurs, les

résultats doivent être nuancés au niveau de la comparaison des stratégies. Dans le cas du cycle WLTC, l'optimisation décomposée est la moins performante avec une surconsommation de 2 % par rapport au filtrage. Cependant la condition de charge sustaining n'est pas respectée. L'énergie mise en jeu entre le début et la fin du cycle de conduite dans le système batterie-SCs pour les trois stratégies, et le bilan énergétique de la propulsion sont représentés Figure IV-28.b. Le système batterie-SCs a un bilan énergétique négatif à la fin du cycle (Figure IV-28.b). Cela correspond à une charge du système batterie-SCs par la PàC entre le début et la fin du cycle de conduite. C'est le phénomène inverse qui apparaît dans le cas du cycle « Réel 1 » avec consommation de H<sub>2</sub> moins importante dans le cas de l'optimisation décomposée, mais avec un bilan énergétique positif du système batterie-SCs. Un autre aspect doit être également pris en compte. La limitation de la tension des SCs correspond à une phase de non optimalité, donc de perte de performances de la stratégie. Or l'optimisation issue de l'approche décomposée est la seule parmi les stratégies présentées à occasionner des phases de limitation de la tension des SCs.

- ✓ *Valeur efficace du courant de la batterie* : la valeur efficace du courant de la batterie est représentée Figure IV-28.c. L'optimisation issue de l'approche globale permet de limiter considérablement la valeur efficace du courant de la batterie. Celle-ci est trois fois moins importante que celle obtenue dans le cas de la stratégie de filtrage pour les deux cycles de conduite (cf. Tableau IV-5). L'approche globale permet également d'obtenir des résultats plus intéressants par rapport à l'approche décomposée. Cela confirme la tendance observée par simulation (cf. Chapitre III). Dans le cas du cycle WLTC, l'optimisation décomposée permet de réduire de 18 % la valeur efficace du courant de la batterie par rapport au filtrage. Les résultats sont beaucoup plus proches (2 %) dans le cas du cycle « Réel 1 ». Cela est dû au fait que la batterie doit faire face à des limitations plus fréquentes de la tension des SCs.
- ✓ *Valeur efficace du courant de la PàC* : cet axe de comparaison ne fait pas partie du critère de performance à minimiser mais sert à évaluer les sollicitations imposées à la PàC. La valeur efficace du courant de la PàC est représentée Figure IV-28.d. L'optimisation décomposée permet d'obtenir les meilleurs résultats sur cet axe de comparaison sur les deux cycles. De plus, le courant de la PàC est quasi-constant dans le cas de cette stratégie, ce qui est intéressant pour sa durée de vie. Sur le cycle réel, le courant de la PàC est également constant. Cela est dû au fait que le facteur d'équivalence lié au courant de la PàC reste constant. En effet, celui-ci est adapté aux limitations de l'état de charge de la batterie. En ce qui concerne les deux autres stratégies, l'optimisation issue de l'approche globale donne de meilleurs résultats que le filtrage sur le cycle WLTC alors que la tendance s'inverse dans le cas du cycle réel. L'approche globale est par conséquent sensible aux variations des conditions de conduite sur cet axe de comparaison. De plus, des pics de courants apparaissent de manière fréquente au niveau du convertisseur de la PàC sur le cycle réel, dans le cas de l'approche globale. Cela ne favorise pas la durée de vie de la PàC.

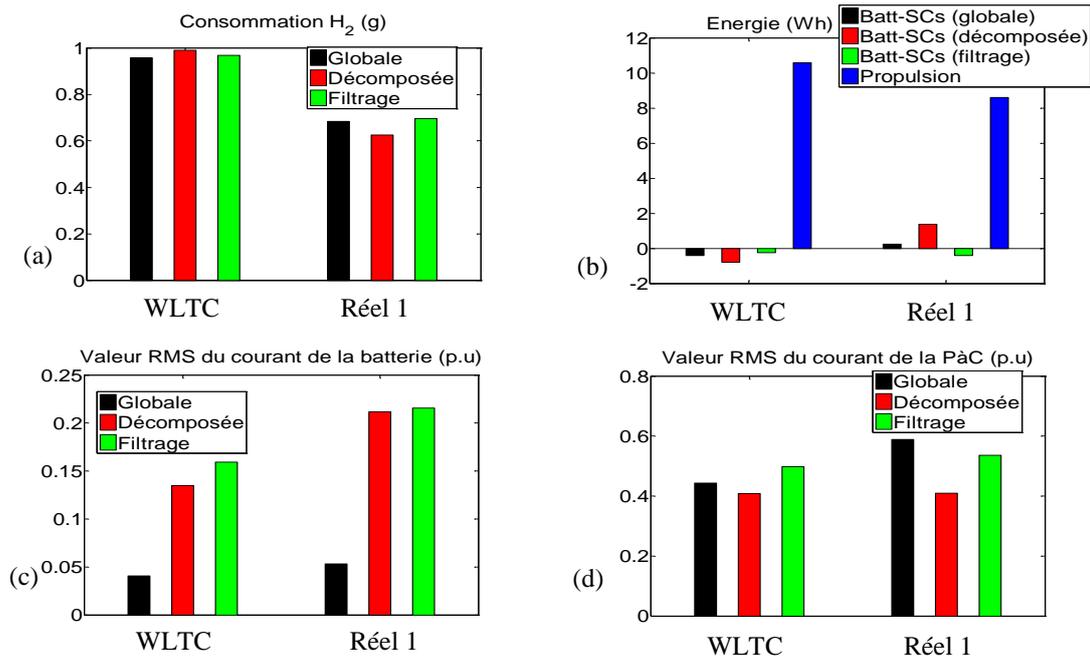


Figure IV-28 : comparaison, (a) consommation de H<sub>2</sub>, (b) énergie mise en jeu dans l'ensemble batterie-SCs et dans le système de propulsion, (c) valeur efficace du courant de la batterie, (d) valeur efficace du courant de la PàC

Tableau IV-5: synthèse des écarts entre les différentes stratégies <sup>1</sup>

	<b>Optimisation, approche globale</b>	<b>Optimisation, approche décomposée</b>
<b>Filtrage</b>	Consommation H <sub>2</sub> : + 1 %   + 2 %	Consommation H <sub>2</sub> : - 2 %   + 11 %
	<i>i<sub>b</sub></i> RMS : + 300 %   + 300 %	<i>i<sub>b</sub></i> RMS : + 18 %   + 2 %
	<i>i<sub>c</sub></i> RMS : + 12 %   - 9 %	<i>i<sub>c</sub></i> RMS : + 22 %   - 31 %

En résumé, dû aux contraintes liées au système expérimental (échelle), des conclusions pleinement objectives ne peuvent pas être faites sur le critère de consommation de dihydrogène. Concernant l'axe de comparaison correspondant à la valeur efficace du courant de la batterie, l'optimisation par l'approche globale s'avère être peu sensible aux variations des conditions de conduites et reste la plus efficace sur les deux cycles. En ce qui concerne l'axe de comparaison lié à la valeur efficace de la PàC, l'optimisation par source équivalente reste la stratégie la plus efficace sur les deux cycles. Par ailleurs, le point essentiel est que le partage de puissance entre les différentes sources se fait de manière efficace en temps réel par l'intermédiaire des stratégies développées Chapitre III.

<sup>1</sup> Les résultats sont exprimés sous la forme « résultats WLTC | résultat cycle « Réel 1 ». Les écarts correspondent aux résultats du filtrage par rapport à l'optimisation (un écart positif équivaut à une valeur d'amplitude supérieure pour le filtrage)

## IV.4 Conclusion du chapitre

L'objectif de ce chapitre était de valider expérimentalement certaines des stratégies développées. Il s'agissait d'une part, d'évaluer la faisabilité des stratégies en temps réel, et d'autre part, de comparer leurs performances par rapport à une stratégie existante.

Dans un premier temps, la stratégie à base d'optimisation développée dans le cas d'un véhicule batterie-SCs à un convertisseur DC-DC ( *$\lambda$ -control*) a été comparée à une stratégie à base de règles, le filtrage. Pour ce faire, le véhicule électrique Tazzari Zéro a été émulé. Au-delà de l'efficacité énergétique et de la durée de vie de la batterie, les deux stratégies devaient assurer la limitation de la tension des SCs pour tout cycle de conduite. Les résultats expérimentaux ont montrés que le  *$\lambda$ -control* donne de meilleures performances que le filtrage dans le cas du cycle de référence, pour lequel les paramètres des stratégies ont été définis. Les performances des stratégies deviennent équivalentes dans le cas de cycles réels non connus à l'avance. Une différence de 2 % sur la valeur efficace du courant de la batterie a été obtenue dans le cas de cycles réels. La principale conclusion est que le  *$\lambda$ -control* serait plus adapté aux véhicules effectuant des trajets similaires (bus urbains,...) alors que le filtrage s'avère intéressant dans le cas de cycles de conduite aléatoires. Cependant, il est nécessaire d'effectuer des tests sur plus de cycles de conduite afin de confirmer cette hypothèse.

Dans un second temps, les stratégies à base d'optimisation développées dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs (approche globale et approche décomposée) ont été comparées à une stratégie de filtrage en temps réel. Les stratégies ont été premièrement comparées sur le cycle de référence (WLTC classe 2). En termes de consommation de dihydrogène, les trois stratégies se sont avérées équivalentes. La stratégie à base d'optimisation issue de l'approche globale s'est avérée être la plus efficace en ce qui concerne la minimisation de la valeur efficace du courant de la batterie. La stratégie à base d'optimisation issue de l'approche décomposée a donné de meilleures performances en ce qui concerne les sollicitations de la PàC. Cette tendance a également été observée par simulation. Les stratégies ont été aussi testées sur un cycle réel. La stratégie à base d'optimisation globale semble plus affectée par les variations des cycles de conduite. En effet, la tendance liée aux sollicitations imposées à la PàC s'est inversée. Par ailleurs, les limitations expérimentales ont contraint à ne pas tester tous les sous-systèmes à la même échelle réduite. Par conséquent, certains résultats, doivent être nuancés.

Le point essentiel est que la structuration des stratégies à base d'optimisation par la méthodologie proposée, a favorisé leur fonctionnement en temps réel. Les stratégies issues des deux approches (règles et optimisation) fonctionnent aussi bien en temps réel (pas de changement de fréquence d'échantillonnage,...). Aussi, la majorité des travaux proposés sur la gestion d'énergie de véhicules à plus de 2 sources sont axés sur des stratégies à base de règles ou hors ligne à base d'optimisation, ce qui confirme l'utilité de la méthodologie.

# Conclusion générale

## Travaux réalisés

La gestion d'énergie de véhicules multi-sources s'avère être particulièrement complexe. Cette complexité s'accroît avec l'augmentation du nombre de sources. L'objectif de la thèse était de proposer une méthode structurée pour la gestion d'énergie de véhicules électriques et hybrides multi-sources.

Le premier chapitre a montré l'intérêt des systèmes multi-sources pour répondre aux enjeux du véhicule du futur. La notion de « source d'énergie » a été définie afin de mener à bien les différents travaux relatifs à cette thèse. Les stratégies à base d'optimisation offrent la possibilité de se rapprocher de la meilleure utilisation possible des sources d'énergie selon un critère prédéfini. La synthèse de ce type de stratégie reste en revanche loin d'être systématique. Le développement d'une méthode structurée dédiée à la synthèse de ce type de stratégie, pourrait contribuer grandement à faciliter leur réalisation, en particulier dans le cas de véhicules multi-sources au sens large plus de 2 sources).

Dans le second chapitre, des stratégies de gestion d'énergie applicables en temps réel basées sur la commande optimale, ont été développées pour des véhicules à deux sources d'énergie. La synthèse des stratégies temps réel à base d'optimisation s'est réalisée en trois étapes, la *formulation* du problème de commande optimale, la *résolution* du problème de commande optimale (*Calcul des Variations*) pour un cycle de conduite de référence (connu *a priori*), et l'utilisation d'une méthode d'*adaptation* aux variations des conditions de conduite ( *$\lambda$ -control*) afin d'assurer notamment la sécurité du système (limitations). Une méthode dédiée à la formulation du problème de commande optimale, qui est une étape essentielle, a été proposée. Cette méthode utilise la Représentation Energétique Macroscopique (REM). La REM présente l'avantage de respecter la causalité « physique » (causalité intégrale) d'une part, et de distinguer clairement la commande dite « locale » et la stratégie de gestion d'énergie d'autre part. Les variables intervenant dans la formulation du problème, les variables de commande en particulier, peuvent ainsi être déduites à l'aide de la REM. Un modèle réduit du système, nécessaire à l'étape de résolution du problème, peut être également défini. Une méthodologie relative à la réalisation de ce modèle réduit a été également proposée. Le modèle réduit est issu de la réduction de la REM et de la structure de commande du système. La structuration de l'étape de *formulation* du problème de commande optimale par l'intermédiaire de la REM, a donc permis de simplifier l'étape de *résolution*. La méthode a été appliquée à trois véhicules à deux sources faisant intervenir des architectures et des sources différentes. Dans le cas de deux véhicules électriques batterie-SCs, la valeur efficace du courant de la batterie, relative à sa durée de vie, a été réduite de 15 % par rapport au véhicule en configuration batterie seule. Les limitations de la tension des SCs, traduisant entre autres la sécurité du système, ont été respectées. Dans le cas d'un véhicule électrique mixte PàC-SCs, la valeur efficace du courant de la PàC a été

réduite de 18 % par rapport au véhicule avec PàC. Par ailleurs, les gains obtenus dépendent du système étudié, de son dimensionnement, ainsi que des cycles de conduite.

Dans le troisième chapitre, la méthode de formulation du problème de commande optimale, développée dans le second chapitre, a été étendue à un véhicule à trois sources d'énergies. La commande du sous-système d'alimentation a premièrement été réalisée en considérant le sous-système dans sa globalité. Dans un second temps, le sous-système d'alimentation a été décomposé en sources équivalentes. La synthèse par décomposition a également été faite en 3 étapes (formulation, résolution, adaptation). La REM permet d'effectuer la décomposition du système et de ce fait, structurer autrement la stratégie ; décomposition en plusieurs stratégies (stratégies internes et stratégie externe). Par conséquent, le principal avantage de l'approche décomposée est la flexibilité qu'elle procure. Les deux approches (globale et décomposée) ont été comparées dans le cas d'un véhicule PàC-batterie-SCs et une commande optimale. La consommation de  $H_2$  a été inférieure dans l'approche par sources équivalentes par rapport à l'approche globale (-7 %). Cependant la batterie a été plus sollicitée. Enfin, l'approche décomposée a été étendue à un véhicule à quatre sources d'énergie. Des éléments de réflexion ont été également proposés pour appréhender la gestion d'énergie de véhicules à N sources.

Le quatrième chapitre était dédié à la validation expérimentale de la démarche, en mettant à l'épreuve les stratégies de gestion d'énergie développées dans le cadre de la thèse. Cela a été réalisé par la mise au point de l'émulation d'une propulsion électrique à deux sources batterie-SCs, puis à trois sources PàC-batterie-SCs. La faisabilité des différentes stratégies en temps réel a été validée. Afin d'évaluer les performances des stratégies à base d'optimisation développées (dites  $\lambda$ -control), celles-ci ont été comparées à une stratégie classique à base de règles, le filtrage. Les variations des conditions de roulage ont également été prises en compte par l'utilisation de cycles de conduite réels. Dans le cas du VE batterie-SCs, le  $\lambda$ -control s'est avéré plus performant sur le cycle de conduite de référence. La variation des conditions de roulage avec des cycles réels a conduit à un rapprochement des performances entre le  $\lambda$ -control et le filtrage. Une différence de 2 % sur la valeur efficace du courant de la batterie (critère de performances) a été obtenue sur les cycles réels. Dans le cas du véhicule PàC-batterie-SCs, le  $\lambda$ -control (approche globale et approche décomposée) et le filtrage ont donné des résultats équivalents en termes de consommation de  $H_2$  sur les différents cycles de conduite (terme du critère de performances). Les variations des conditions de roulage ont affecté le  $\lambda$ -control issu de l'approche décomposée ainsi que le filtrage, au niveau de la valeur efficace de la batterie (terme du critère de performances). La sensibilité du le  $\lambda$ -control issu de l'approche globale a été plus marquée au niveau des sollicitations de la PàC. Cependant, les limitations expérimentales ayant contraint à ne pas tester tous les sous-systèmes à la même échelle réduite, la comparaison des performances des stratégies doit être nuancée. Le point à retenir est que la méthodologie proposée, a favorisé le fonctionnement des stratégies en temps réel. Les stratégies à base d'optimisation fonctionnent aussi bien en temps réel que la stratégie de filtrage, et ce, sans modification des paramètres (fréquence d'échantillonnage,...).

## **Apports des travaux**

L'originalité première des travaux se situe dans le développement d'une méthodologie pour la formulation du problème de commande optimale, dans le cas de l'utilisation d'une stratégie à base d'optimisation pour un véhicule ayant plus de deux sources. En dépit de l'importance de cette étape, la majorité des travaux issus de la littérature traitent essentiellement de l'étape de résolution du problème de commande optimale. Il est important de noter que la méthodologie proposée pour la formulation du problème de commande optimale, peut être utilisée pour plusieurs critères de performances et peut être utilisée pour d'autres méthodes de résolution. D'un point de vue plus général, un apport essentiel des travaux se situe dans la proposition d'une méthodologie structurée pour la gestion d'énergie de véhicules multi-sources par l'intermédiaire du formalisme REM. Cela passe par la gestion des éléments de couplage mis en évidence par la REM. La décomposition du sous-système en sources équivalentes est également un point important dans la contribution. Cette décomposition est faite de manière structurée par l'intermédiaire de la REM, et permet d'avoir une flexibilité au niveau des approches utilisées pour les stratégies de gestion d'énergie. La méthode proposée est applicable pour plusieurs types de véhicules multi-sources. Un autre point important concerne le formalisme REM. La REM a pour vocation première la structuration de la commande dite « locale » du système considéré. La REM a été utilisée dans les travaux de cette thèse, afin de déterminer également le niveau de commande dite « globale » (stratégie de gestion d'énergie). La REM a été un outil d'aide à la structuration de la stratégie (définition des variables de commande, décomposition en sources équivalente), ce qui va simplifier le paramétrage de la stratégie (modèle réduit pour la synthèse de la stratégie à base d'optimisation).

## **Perspectives des travaux**

En ce qui concerne les perspectives méthodologiques, les travaux présentés pourraient être enrichis de différentes manières. Premièrement, il serait intéressant de comparer les performances des stratégies présentées par rapport à une stratégie à base d'optimisation hors ligne. Toujours dans la comparaison des stratégies, des stratégies à base d'optimisation ont été comparées expérimentalement à une stratégie de filtrage sur plusieurs cycles de conduite. Les paramètres des stratégies étaient fixes. Il serait intéressant d'effectuer le même type d'essais mais avec des paramètres adaptatifs. La comparaison des stratégies développées par rapport à d'autres stratégies temps réel à base d'optimisation, comme la MPC (Model-Predictive Control) pourrait également étoffer les travaux. Au niveau du formalisme REM, il serait intéressant de comparer la décomposition de la stratégie par « modes de fonctionnement » proposée dans [Syed 2012] et [Horrein 2015] avec la décomposition par la REM proposée dans cette thèse. Il pourrait être également envisagé de se prévaloir de la flexibilité de la décomposition, et d'utiliser des stratégies à base d'optimisation en mettant en œuvre des méthodes de résolution différentes pour gérer les différentes sources équivalentes. Une tendance actuelle est également de coupler le dimensionnement et la gestion d'énergie au travers de l'optimisation, les outils développés pourrait y contribuer [Roboam 2012]. Par ailleurs, le choix du critère de performances reste

une problématique majeure dans l'élaboration de stratégies à base d'optimisation. Par exemple, la valeur efficace du courant de la batterie a été choisie comme critère de performances relatif à la durée de vie de celle-ci. Des travaux ont été présentés dans la littérature sur l'utilisation de modèles de vieillissement de batterie, afin de déterminer le critère de performances relatif à la durée de vie de la batterie. Il serait intéressant d'utiliser ce type de démarche afin de rendre le critère de performances choisi plus pertinent. A plus long terme, des tests expérimentaux de vieillissement pourraient être effectués sur des cellules de batteries stressées de la manière dont le feraient les stratégies développées dans le cadre de cette thèse. Enfin, les tests expérimentaux ont été réalisés à échelle réduite. La réalisation de tests expérimentaux à pleine échelle permettrait d'être plus fidèle au système réel.

La principale perspective applicative pourrait être l'extension de la méthode proposée à d'autres types de véhicules multi-sources, notamment des véhicules hybrides innovants (architectures particulières) et avec des problèmes de commande optimale multi-objectifs. En effet, des véhicules hybrides innovant feraient apparaître des couplages énergétiques plus complexes et d'autres contraintes. Les systèmes multi-sources sont également présents dans les applications stationnaires. Les principes développés dans le cadre de cette thèse, pourraient être étendus à des applications multi-sources dans le cas de réseaux électriques stationnaires (avec des énergies renouvelables). Cela pourrait permettre entre autres, de prendre en compte des échelles de temps différentes de celles liées à un cycle de conduite. Par ailleurs, le nombre et le type de générateurs peuvent être différents (système éolien, panneaux solaires,...).

Une synthèse des apports et des principales perspectives est donnée Tableau i

Tableau i : synthèse des apports et des perspectives des travaux

Apport majeurs des travaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimisation : formulation de manière structurée avec la déduction des variables de commande à l'aide de la REM</li> <li>• REM : utilisation de la REM comme outil d'aide à la synthèse de la stratégie de gestion d'énergie</li> <li>• REM et optimisation : déduction d'un modèle réduit du système considéré par l'intermédiaire de la REM</li> <li>• Système multi-sources et REM : définitions de règles afin de gérer au mieux les degrés de libertés relatifs aux systèmes multi-sources (éléments de couplage dans REM)</li> <li>• Système multi-sources et REM : établissement de règles afin d'effectuer des regroupements entre les sources, dans le but de rendre plus flexible la stratégie de gestion d'énergie</li> </ul>
Perspectives méthodologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comparaison avec une méthode de résolution hors ligne</li> <li>• Test de la méthodologie avec d'autres types de stratégies temps réels (MPC,...)</li> <li>• Tests expérimentaux à échelle de puissance plus proche du système réel (3 sources)</li> <li>• Couplage dimensionnement-gestion d'énergie</li> <li>• Utilisation de critères de performances plus évoluées</li> </ul>
Perspectives applicatives	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Application des principes à des véhicules hybrides innovants</li> <li>• Application des principes à du stockage stationnaire</li> </ul>

# Nomenclature

## Variables

En ce qui concerne la signification de la partie variable, chaque caractère a une signification unique. Il y a cependant quelques exceptions. Le caractère « C » peut désigner un couple mécanique ou une capacité (batterie ou condensateur). Le caractère « k » peut désigner un rapport de réduction (mécanique) ou un coefficient de répartition dans la commande. Par ailleurs, une variable peut être composée de différents caractères. Par exemple, « Cor » correspond à la fonction de transfert d'un correcteur.

## Indices

Les indices correspondent aux éléments du système. Par ailleurs, certains ajustements peuvent apparaître. Un indice précédé de « 1 » signifie que cela concerne un seul élément dans un arrangement de plusieurs éléments du même type. Par exemple, l'indice « 1b » signifie que cela concerne une cellule de la batterie.

Certains indices peuvent être composés de deux chaînes de caractères liées par un tiret. La seconde chaîne de caractères correspond à un attribut de plus de la grandeur. Les indices suivies de « -ref » correspondent à des grandeurs de références. Par exemple,  $u_{bus-ref}$  correspond à la tension de référence du bus continu. De même, les indices suivies de « -mes » correspondent à des mesures. Aussi, les indices suivies de « -n » correspondent à des valeurs nominales, les indices suivies de « -M » correspondent à des valeurs maximales et les indices suivies de « -m » correspondent à des valeurs minimales. Par exemple  $u_{sc-M}$  correspond à la valeur maximale de la tension des SCs. Il y a également d'autres types d'attributs. Par exemple,  $N_{sc-pui}$  correspond au nombre (grandeur) de SCs (élément concerné du système) nécessaire pour un critère en puissance (attribut de la grandeur).

Le principe de la désignation des grandeurs est représenté Figure a. Les nomenclatures concernant les variables et les indices sont est donnée respectivement Tableau a et Tableau b.

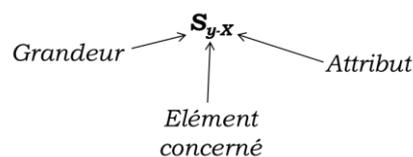


Figure a : désignation des grandeurs

*Remarque* : certaines variantes peuvent apparaître dans la désignation des grandeurs

Tableau a : nomenclature des variables

<i>C</i>	capacité (Ah ou F) ou couple (Nm)	<i>N</i>	nombre d'éléments
<i>d</i>	ratio tension minimale/maximale	<i>P</i>	puissance (W)
<i>DoD</i>	profondeur de décharge (%)	<i>Q</i>	débit
<i>E</i>	énergie (J)	<i>r</i>	résistance ( $\Omega$ )
<i>f</i>	fréquence (Hz)	<i>R</i>	rayon (m)
<i>F</i>	effort (N)	<i>SoC</i>	état de charge (%)
<i>H</i>	Hamiltonien	<i>t</i>	instant (s)
<i>i</i>	courant (A)	<i>T</i>	horizon de temps (s)
<i>J</i>	critère de performances ou moment d'inertie (kg.m <sup>2</sup> )	<i>v</i>	vitesse linéaire (m/s)
<i>k</i>	rapport de réduction mécanique ou coefficient de répartition (commande)	<i>V</i>	volume (L)
<i>K</i>	paramètre d'un correcteur	<i>x</i>	variable d'état
<i>L</i>	inductance (H)	<i>Z</i>	impédance ( $\Omega$ )
<i>m</i>	fonction de modulation	$\alpha$	angle (rad)
<i>M</i>	masse (kg)	$\lambda$	multiplicateur de Lagrange
		$\rho$	masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )
		$\Omega$	vitesse angulaire (rad/s)

Tableau b : nomenclature des indices

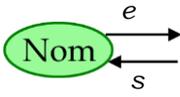
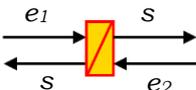
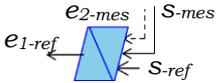
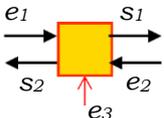
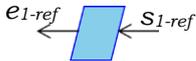
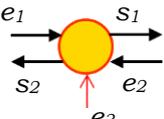
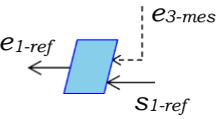
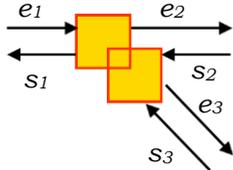
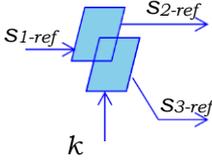
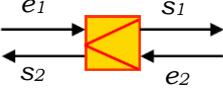
<i>O</i>	initial	<i>s</i>	série
<i>b</i>	batterie	<i>mec</i>	mécanique
<i>BF</i>	boucle fermée	<i>ond</i>	onduleur
<i>bus</i>	bus DC	<i>p</i>	proportionnel
<i>bv</i>	boîte de vitesses	<i>po</i>	système poulie-courroie
<i>comb</i>	combustible	<i>prop</i>	propulsion
<i>em</i>	machine électrique	<i>pui</i>	puissance
<i>emb</i>	embrayage		
<i>en</i>	énergie	<i>R</i>	répartition
<i>f</i>	final	<i>req</i>	requis
<i>fc</i>	système PaC (Fuel Cell)	<i>tr</i>	transmission mécanique
<i>fr</i>	freins mécaniques	<i>sc</i>	supercondensateurs
<i>g</i>	global	<i>syst</i>	système
<i>ge</i>	groupe électrogène	<i>sw</i>	commutation interrupteurs
<i>h</i>	convertisseur DC-DC (hacheur)	<i>veh</i>	véhicule
<i>H</i>	dihydrogène	<i>vol</i>	volume

# Acronymes

ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
GE	Groupe Electrogène
MAS	Machine Asynchrone
ME	Machine Electrique
MCI	Moteur à Combustion Interne
OCV	Open circuit Voltage (tension à vide de la batterie)
PàC	Pile à Combustible
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PMP	Principe du Minimum de Pontriaguine
REM	Représentation Energétique Macroscopique
SC	Supercondensateur
VE	Véhicule Electrique
VH	Véhicule Hybride



## Annexe A : éléments constitutifs de la REM

	<p>Variables d'action et réaction</p> $P = e_1 e_2$		<p>Source d'énergie</p>
	<p>Accumulation d'énergie</p>		<p>Inversion avec asservissement</p>
	<p>Convertisseur mono-domaine</p>		<p>Inversion directe</p>
	<p>Convertisseur multi-domaine</p>		<p>Inversion directe avec rejet de perturbation</p>
	<p>Couplage mono-domaine</p>		<p>Inversion d'un couplage par pondération</p>
 $e_1 s_2 < s_1 e_2$	<p>Adaptation de puissance</p>		<p>Stratégie de gestion d'énergie</p>

# Annexe B : modélisation, REM et commande du sous-système de propulsion

Cette annexe présente les éléments relatifs au sous-système de propulsion de la Tazzari Zéro. La commande du sous-système de propulsion est décrite. La désignation des différentes variables est présentée en Nomenclature.

## 1) Modélisation et Représentation Energétique Macroscopique

### a. Modélisation du sous-système de propulsion

Le courant imposé par le sous-système de propulsion est déduit d'une cartographie de pertes de l'ensemble onduleur – machine électrique (propulsion électrique) et de sa commande. Cette cartographie a été validée par l'intermédiaire de tests du véhicule sur route avec une erreur inférieure à 5 % sur la consommation d'énergie de l'ensemble [Depature 2014]. Le modèle est exprimé par la relation (B-1) avec  $P_{prop}$  la puissance appelée par l'ensemble onduleur – machine électrique.

$$i_p = \frac{P_{prop}}{u_b} \quad (\text{B-1})$$

La transmission mécanique se décompose en un réducteur et un différentiel mécanique. Le véhicule est supposé roulant en ligne droite, de plus le contact entre les roues et la chaussée est négligé. Par conséquent, le réducteur et le différentiel mécanique sont modélisés par un gain global  $k_{tr}$  et un rendement global  $\eta_{tr}$  (B-2) [Verhille 2007].

$$\begin{cases} C_{tr} = k_{tr} C_{me} \eta_{tr}^{\gamma_{tr}} \\ \Omega_{tr} = k_{tr} \Omega_{roue} \end{cases} \text{ avec } \gamma_{tr} \in [0,1], \begin{cases} \gamma_{tr} = -1, P_{tr} < 0 \\ \gamma_{tr} = 1, P_{tr} \geq 0 \end{cases} \quad (\text{B-2})$$

A partir des hypothèses émises pour le différentiel mécanique, les roues peuvent se ramener à une roue équivalente (modèle de la bicyclette). La roue équivalente est modélisée par la relation (B-3) avec  $R_{roue}$  le rayon d'une roue du véhicule.

$$\begin{cases} F_{roue} = \frac{C_{tr}}{R_{roue}} \\ \Omega_{roue} = \frac{v_{veh}}{R_{roue}} \end{cases} \quad (\text{B-3})$$

La connexion entre les freins mécaniques et les roues est modélisé par (B-4).

$$F_{tot} = F_{roue} - F_{fr} \quad (\text{B-4})$$

Par la suite, le terme « route » sera utilisé pour désigner l'ensemble des éléments extérieurs influençant l'avancement du véhicule. Le châssis est modélisé par la relation (B-5) représentant le principe fondamental de la dynamique, avec  $F_{route}$  l'ensemble des efforts imposés par la route au châssis. L'ensemble des inerties du sous-système de propulsion (machine électrique et roues) sont ramenées au niveau du châssis par la règle de concaténation [Bouscayrol 2003], avec  $M_{veh}$  la masse totale du véhicule. Les moments d'inerties  $J_{em}$  et  $J_{roue}$  ne sont pas pris en compte dans l'étude. Dès lors  $M_{tot}$  est égale à  $M_{veh}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{tot} \frac{d}{dt} v_{veh} = F_{tot} - F_{route} \\ M_{tot} = M_{veh} + \left( \frac{k_{tr}}{R_{roue}} \right)^2 J_{em} + \frac{1}{R_{roue}^2} J_{roue} \end{array} \right. \quad (\text{B-5})$$

La route impose les efforts aérodynamiques  $F_{aero}$ , les efforts dus aux pentes  $F_{pente}$  ainsi que les efforts  $F_{roul}$  dus au contact pneu/sol. Cela s'exprime par les relations (B-6) et (B-7). A noter que les expressions des différents efforts dus à la route, sont exprimées dans l'hypothèse d'un angle de pente  $\alpha_{pente}$  très petit.

$$F_{route} = F_{aero} + F_{pente} + F_{roul} \quad (\text{B-6})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{roul} = f M_{tot} g \\ F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_x S_{avt} (v_{veh} + v_{ven})^2 \\ F_{pente} = M_{tot} g \alpha_{pente} \end{array} \right. \quad (\text{B-7})$$

A noter que la puissance du système de propulsion s'exprime par conséquent par la relation (B-8) où  $\eta_{prop}$  correspond au rendement global de la propulsion électrique (déterminé par la cartographie) et de la transmission mécanique (rendement considéré constant).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{prop} = \left[ \left( M_{tot} \frac{d}{dt} v_{veh} + F_{route} + F_{fr} \right) v_{veh} \right] \eta_{prop}^{\gamma_{prop}} \\ \gamma_{prop} \in [0,1], \begin{cases} \gamma_{prop} = -1, P_{prop} > 0 \\ \gamma_{prop} = 1, P_{prop} \leq 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (\text{B-8})$$

## b. REM du sous-système de propulsion

La REM du sous-système de propulsion est présentée Figure B-1. Le système d'alimentation est représenté par une source de tension (ovale vert). Le modèle de l'ensemble Machine Asynchrone (MAS)-onduleur avec la commande associée est représenté par un élément de conversion d'énergie électromécanique (rond orange, multi domaine). Des modèles plus complexes de MAS (et autres machines électriques) ont été représentés par l'intermédiaire de la REM. Le lecteur pourra se référer notamment à [Chen 2010] pour plus d'informations sur l'utilisation de ces modèles. Les modèles de la transmission mécanique

et de la roue équivalente du véhicule sont représentés par des éléments de conversion directe d'énergie (carré orange, mono domaine). La connexion entre les freins mécaniques et les roue du véhicule est représenté par un élément de couplage (double carré orange). Le modèle du châssis du véhicule est représenté par un élément d'accumulation d'énergie (rectangle barré). Enfin le modèle de la route est représenté par une source.

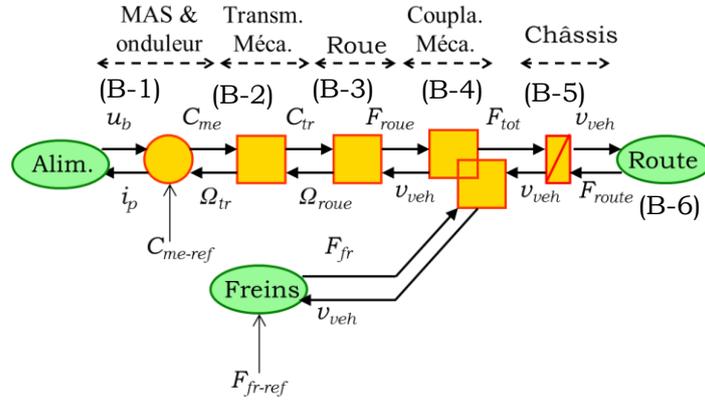


Figure B-1: REM du sous-système de propulsion

## 2) Structure de commande du sous-système de propulsion

La structure de commande du sous-système de propulsion est réalisée à partir de la chaîne de réglage correspondante (Figure B-2).

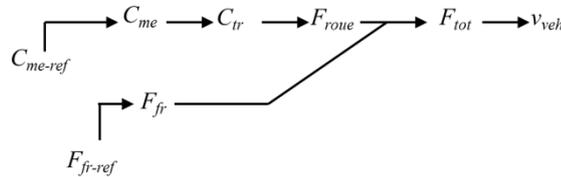


Figure B-2 : chaîne de réglage du système de propulsion

L'inversion du châssis nécessite l'utilisation d'un correcteur :

$$F_{tot-ref} = Cor_v[v_{veh-ref} - v_{veh}] + F_{route} \quad (B-9)$$

L'inversion du couplage mécanique entre les freins et les roues est réalisée par l'intermédiaire d'un coefficient de répartition  $k_{R-mec}$  de l'effort total de référence  $F_{tot-ref}$  entre la référence de l'effort des roues  $F_{roue-ref}$  et la référence de l'effort des freins  $F_{fr-ref}$ . Comme le montre la relation (B-10), si  $k_{R-mec}$  vaut 1 les freins mécaniques ne sont pas utilisés. A l'inverse, si  $k_{R-mec}$  vaut 0 cela correspond à une phase de freinage exclusivement mécanique. Une valeur de  $k_{R-mec}$  entre ses deux valeurs extrêmes correspond à un freinage hybride (électromécanique).

$$\begin{cases} F_{roue-ref} = k_{R-mec} F_{tot-ref} \\ F_{fr-ref} = (k_{R-mec} - 1) F_{tot-ref} \end{cases} \quad \text{avec } k_{R-mec} \in [0,1] \quad (\text{B-10})$$

L'inversion de la roue est une inversion directe :

$$C_{tr-ref} = F_{roue-ref} R_{roue} \quad (\text{B-11})$$

L'inversion de la transmission est une inversion directe :

$$C_{em-ref} = C_{tr-ref} k_{tr} \quad (\text{B-12})$$

La structure de commande du sous-système de propulsion est présentée Figure B-3. La gestion du couplage se fait par l'intermédiaire de la stratégie. Celle-ci consiste à gérer les freins mécaniques du véhicule en imposant les valeurs appropriées de  $k_{R-mec}$  [Lhomme 2007]. C'est l'objet de la partie suivante.

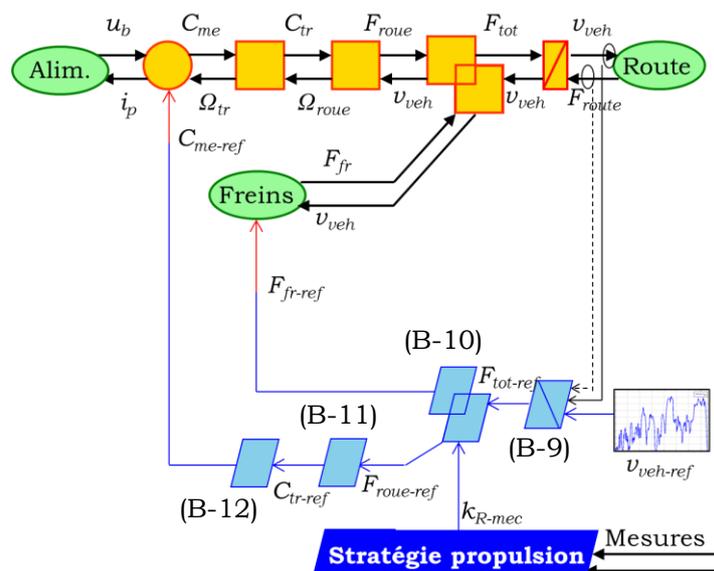


Figure B-3: REM et structure de commande du sous-système de propulsion

### 3) Stratégie du sous-système de propulsion pour le VE batterie-SCs

Afin de déterminer la stratégie de gestion d'énergie du sous-système de propulsion, trois contraintes sont prises en compte :

- *Architecture du véhicule* : la machine électrique étant couplée à un seul essieu du véhicule (essieu arrière), le freinage régénératif ne peut pas excéder la moitié de l'effort total de freinage du véhicule. Dès lors le coefficient  $k_{R-mec}$  est imposé comme étant inférieur à  $\frac{1}{2}$  en phase de freinage du véhicule Figure B-4.

- *Couple maximale de la machine électrique* : une des règles de la stratégie, consiste à limiter la récupération d'énergie au freinage, en s'assurant de ne pas dépasser les limitations de couple de la machine électrique [Mayet 2014c].
- *Etat de charge de la batterie* : la seconde règle de la stratégie consiste à effectuer un freinage exclusivement mécanique si l'état de charge  $SoC_b$  de la batterie a atteint son niveau maximal  $SoC_{b-M}$ . En effet la batterie étant la source d'énergie principale du véhicule, elle doit être capable de palier à tous les besoins énergétiques de celui-ci.

*Remarque* : une troisième règle aurait pu prendre en compte les limitations en courant de la batterie. Cependant l'hypothèse est faite ici que la batterie est dimensionnée pour tout courant (charge ou décharge) imposé par l'onduleur de la machine électrique. Cette hypothèse est tout à fait valable en pratique.

La stratégie de gestion d'énergie du système de propulsion est représentée Figure B-4

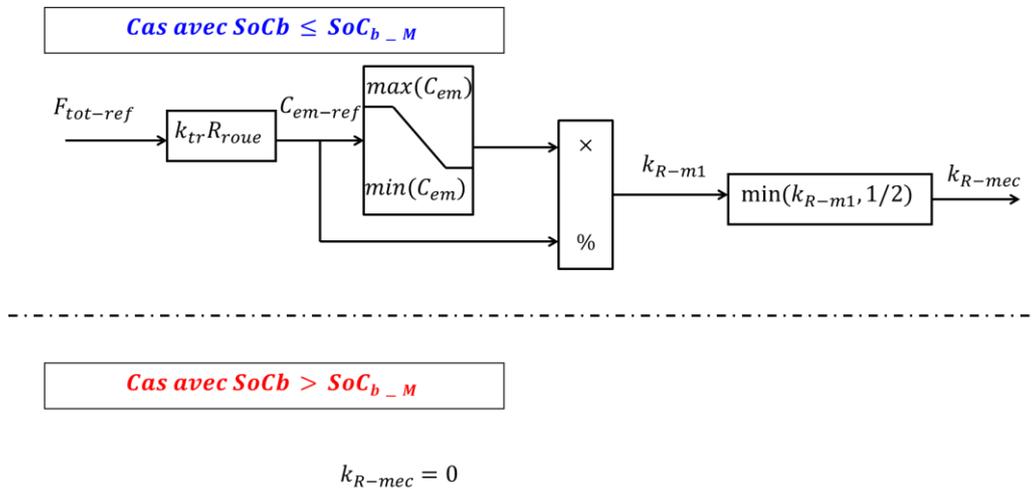


Figure B-4 : stratégie de gestion d'énergie du système de propulsion en phase de freinage

La stratégie du système de propulsion est basée sur les mêmes principes dans le cas des autres véhicules étudiés dans le cadre de la thèse.

## Annexe C : dimensionnement pour le véhicule batterie-SCs

Cette annexe présente la méthode utilisée pour le dimensionnement du banc de SCs dans le cas du véhicule batterie-SCs (cf. Chapitre II). C'est une méthode basée sur des critères heuristiques. La démarche consiste à définir le nombre de SCs nécessaire en prenant en réalisant les étapes définies Figure C-1. C'est une démarche heuristiques. Des méthodes de dimensionnement plus évoluées ont été développées dans d'autres travaux sur des véhicules batterie-SCs, avec notamment l'utilisation d'algorithmes d'optimisation [Hung 2012], [Ostadi 2015].

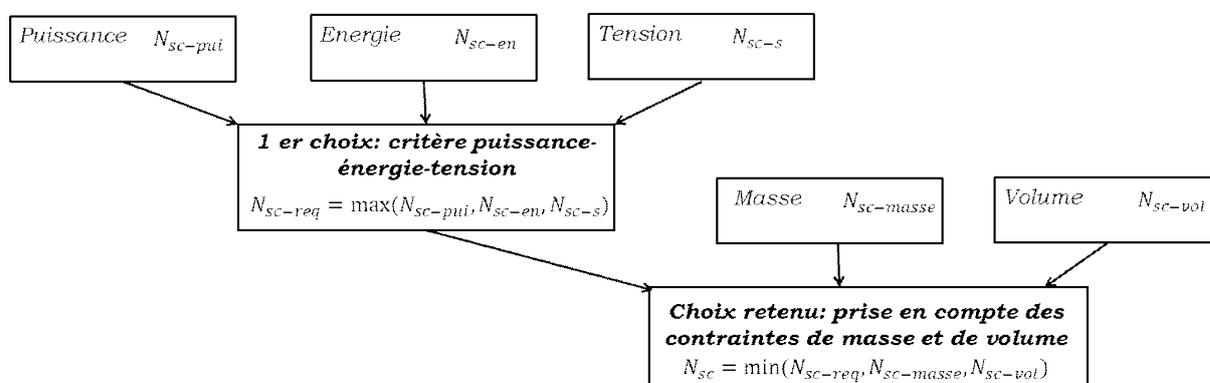


Figure C-1 : démarche de dimensionnement des SCs

### 1) Puissance requise

Cette étape consiste à déterminer le nombre de SCs nécessaire  $N_{sc-pui}$  pour assurer les pics de puissances appelés par le système de propulsion. Afin de déterminer  $N_{sc-pui}$ , il est nécessaire de définir la puissance maximale  $P_{1sc-M}$  d'un SC. Cela est issu de la norme CEI-62391 [Kurzweil 2005]. Cette norme se base sur un modèle  $R-C$  constructeur du SC (Figure C-2). Selon cette norme, la puissance électrique disponible correspond au courant maximal que le supercondensateur est capable de fournir, quand il est déchargé à 40 % de sa valeur nominale  $u_{1sc-n}$ . La puissance  $P_{1sc-M}$  est alors définie par la relation (C-1). En faisant apparaître la chute de tension  $\Delta u_{1sc}$  due à la résistance série  $r_{1sc}$ , cette puissance peut être exprimée par la relation (C-2). En considérant que cette chute de tension est inférieure ou égale à 20 % de la tension nominale  $u_{1sc-n}$ , la puissance  $P_{1sc-M}$  est définie par la relation (C-3).  $N_{sc-pui}$  est ensuite déduit par la relation (C-4) avec  $P_{prop-M}$  la puissance maximale appelée par le système de propulsion.

$$P_{1sc-M} = 0,6u_{1sc-n}i_{1sc} \quad (C-1)$$

$$P_{1sc-M} = 0,6u_{1sc-n} \frac{\Delta u_{1sc}}{R_{1sc}} \quad (C-2)$$

$$P_{1sc-M} = \frac{0,12u_{1sc-n}^2}{R_{1sc}} \quad (C-3)$$

$$N_{sc-pui} = \frac{P_{prop-M}}{P_{1sc-M}} \quad (C-4)$$

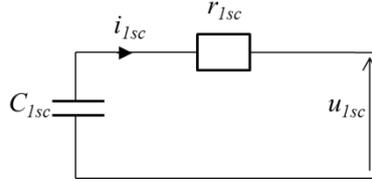


Figure C-2 : Modèle R-C constructeur des SCs

## 2) Energie requise

Le nombre de SCs nécessaire en termes d'énergie  $N_{sc-en}$ , est calculé. Cela nécessite de déterminer un profil de puissance  $P_{sc-req}$  des SCs sur l'horizon du cycle de conduite considéré. Le cycle de conduite considéré est la phase basse vitesse d'un cycle WLTC classe 2 (Figure C-3.a). Ce cycle est issu de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les voitures particulières et véhicules utilitaires légers (*Anglais Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures, WLTP*) [Tutuianu 2014]. Les cycles issus de cette procédure devraient rentrer en vigueur en 2017. Ce cycle à l'avantage de refléter des conditions de conduite réalistes. La simulation est effectuée dans le cas le plus contraignant, où la charge du véhicule correspond à sa charge utile. Le profil de puissance des SCs est déterminé dans le cas de l'application d'une stratégie à base de règles, le *filtrage* [Allègre 2013] (cf. § I.3 et Figure C-4). Cela consiste à imposer les hautes fréquences du profil de puissance du système de propulsion (Figure C-3.b) aux SCs. Le nombre  $N_{sc-en}$  est alors déduit à partir du profil énergétique requis  $E_{sc-req}$  pour le banc de SCs et de l'énergie maximale  $E_{1sc-M}$  d'un SC.  $E_{1sc-M}$  est définie par la relation (C-5) avec  $C_{1sc}$  et  $u_{1sc-M}$  la capacité et la tension maximale d'un SC respectivement. Cela est fait en considérant un modèle parfait des SCs (pas de résistance série) et prenant en compte la limitation basse  $u_{1sc-m}$  de la tension du SC [Barrade 2003]. Cette limitation basse est déterminée afin de limiter les pertes internes dans les SCs. Le nombre  $N_{sc-en}$  de SCs est alors défini par la relation (C-6). La fréquence de filtrage choisie  $f_0$  a été fixée à 45 mHz. A noter que la récupération au freinage est relativement faible car la gestion du système de freinage ne permet pas de récupérer plus de la moitié de la puissance de freinage.

$$\begin{cases} E_{1sc-M} = \frac{1}{2} C_{1sc} u_{1sc-M}^2 (1 - d_{1sc}^2) \\ d_{1sc} = \frac{u_{1sc-m}}{u_{1sc-M}} = 0,65 \end{cases} \quad (C-5)$$

$$N_{sc-en} \geq \frac{\max(E_{sc-req}) - \min(E_{sc-req})}{E_{1sc-M}} \quad (C-6)$$

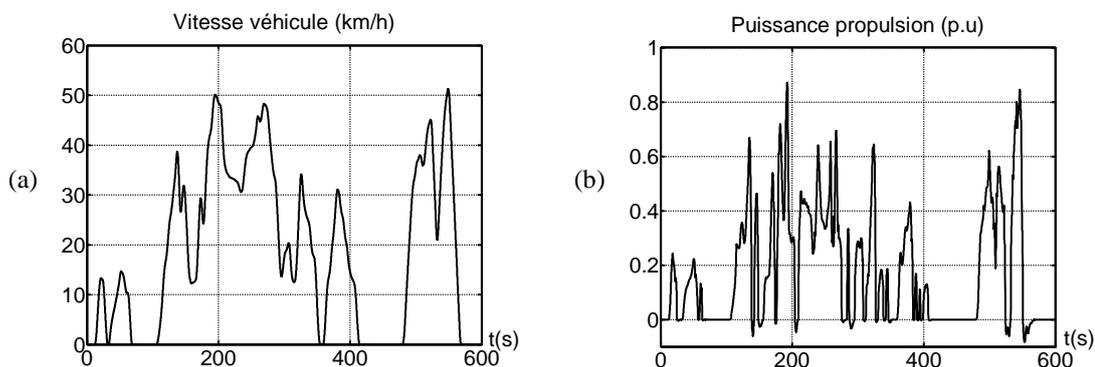


Figure C-3 : (a) cycle WLTC classe 2, phase de basse vitesse, (b) puissance du système de propulsion associée

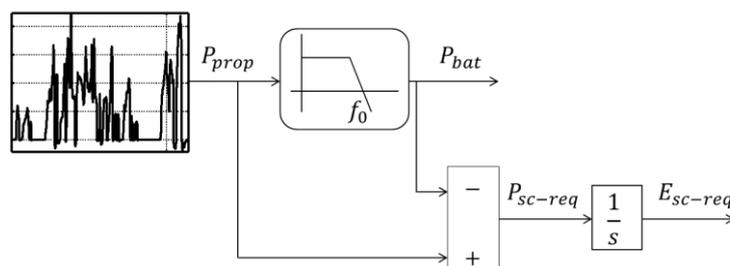


Figure C-4 : Principe du dimensionnement en énergie des SC

### 3) Tension minimale du ban de SCs

Ce critère consiste à déterminer le nombre minimal de SCs requis en série  $N_{sc-s}$ . Ce nombre se déduit de la tension maximale désirée pour l'ensemble du banc de SCs ( $u_{sc-M}$ ) ainsi que de la tension  $u_{1sc}$  d'un seul SC. Le nombre  $N_{sc-s}$  est défini par la relation (C-7).

$$N_{sc-s} \geq \frac{u_{sc-M}}{u_{1sc-M}} \quad (C-7)$$

### 4) Choix préalable du nombre de SCs

Le nombre de SCs retenu  $N_{sc-req}$  correspond au choix le plus contraignant (i.e. nombre de SCs requis le plus élevé). Il est défini par la relation (C-8).

$$N_{sc-req} = \max(N_{sc-pui}, N_{sc-en}, N_{sc-s}) \quad (C-8)$$

Cependant deux autres critères doivent être pris en compte afin de déterminer les limites à ne pas dépasser.

## 5) Masse maximale de la branche des SCs

Cela consiste à déterminer le nombre maximal de SCs ( $N_{sc-masse}$ ) à ne pas dépasser afin de limiter la masse de l'ensemble convertisseur DC-DC ( $M_h$ ), bobine de lissage ( $M_{bob}$ ) et SCs ( $M_{sc}$ ) dans le véhicule. Afin que le véhicule opère en toute sécurité, la Charge Utile (C.U) du véhicule ne doit pas être dépassée. Ceci est exprimé par la relation (C-9) avec  $M_{pers}$  la masse des passagers (conducteur compris). Dans l'étude il y a deux passagers représentant une masse embarquée de 120 kg. Une marge de 5 % de la masse des passagers (2 kg) est également considérée (légère charge supplémentaire).

$$M_h + M_{bob} + M_{sc} + M_{pers} \leq C.U \quad (C-9)$$

## 6) Volume maximale du banc de SCs

Cela consiste à déterminer le nombre maximal de SCs ( $N_{sc-vol}$ ) à ne pas dépasser afin de limiter le volume occupé par l'ensemble convertisseur DC-DC ( $V_h$ ), bobine de lissage ( $V_{bob}$ ), SCs ( $V_{sc}$ ) dans le véhicule. En considérant que l'ensemble SCs, bobine et convertisseur ne peut être installé que dans le coffre du véhicule, la condition nécessaire est exprimée par la relation (C-10) avec  $V_{coffre}$  le volume du coffre du véhicule. Un convertisseur DC-DC (avec bobine de lissage intégrée) d'une densité volumique de puissance de [Kawamura 2008]. En considérant une puissance transisant de 22 kW, le volume du convertisseur (bobine comprise) est de 1,4 l.

$$V_h + V_{bob} + V_{sc} \leq V_{coffre} \quad (C-10)$$

Dès lors le nombre de SCs conservé ( $N_{sc}$ ) correspond finalement à la relation (C-11).

$$N_{sc} = \min(N_{sc-req}, N_{sc-masse}, N_{sc-vol}) \quad (C-11)$$

## 7) Choix final du nombre de SCs

Le L2EP dispose de SCs de type Maxwell et de capacité de 58 F dont les caractéristiques sont données Figure C-5 et Tableau C-1. Ils ont été retenus pour l'étude. La synthèse du dimensionnement des SCs est présentée

Tableau C-2.

Le critère défini par (C-11) impose un nombre de SCs de 47. Cependant le critère en tension impose d'utiliser des branches de 3 modules en série. Il est nécessaire dès lors que le nombre de SCs total soit un multiple de 3. Etant donné que 47 représente la limite maximale, le choix se porte vers 45 SCs. Cela consiste en 15 branches de 3 modules en série. Les branches sont associées en parallèle. L'arrangement des SCs est présenté Figure C-6.



Electric Double Layer Capacitor: BOOSTCAP® Ultracapacitor

## Lug Connection

Series: BPAK



## › Features:

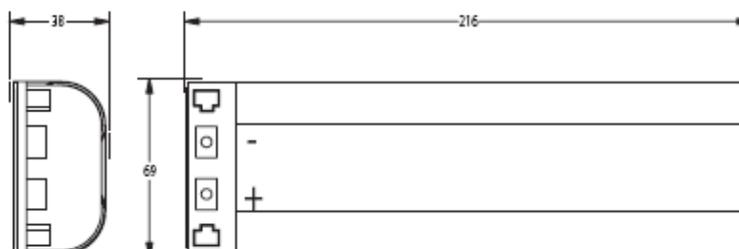
- › 15 V working voltage
- › Individually balanced cells
- › Compact, efficient packaging
- › Strap mountable
- › Module-to-module balance cable included



## › Applications:

- › Automotive subsystems
- › Heavy duty vehicle subsystems
- › Rail system power
- › Windmill pitch control systems
- › Wireless transmissions

## › Dimensions:



Case size	Part #	Balancing	Dimensions, mm			Weight [g]	Vol. [l]	Typical package qty
			L	W	T			
BPAK0350-15EA	103958	Active	216	69	38	500	0.566	1
BPAK0350-15ER	103957	Passive	216	69	38	500	0.566	1

Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

Figure C-5 : dimensions des modules de SCs Maxwell 58 F/ 15V BPAK0350-15EA

<http://www.datasheetarchive.com>

Tableau C-1 : caractéristiques principales des modules de SCs Maxwell 58 F/ 15V BPAK0350-15EA

<http://www.datasheetarchive.com>

Capacité, modèle constructeur (F)	58
Tension nominale (V)	15
Résistance interne, DC ( $\Omega$ )	0,018
Courant nominal (A)	47
Température de fonctionnement ( $^{\circ}\text{C}$ )	-40 à 65
Puissance massique (W/kg)	3000
Puissance volumique (W/L)	2650

Tableau C-2 : synthèse du dimensionnement des SCs

<b>Critère</b>	<b>Contraintes</b>	<b>Nombre de SCs</b>
Puissance	$P_{1sc-M} = 1,14 \text{ kW}$ $P_{sc-req} = 22 \text{ kW}$	$N_{sc-pui} = 20$
Energie	$d = 0,65$ $E_{1sc-M} = 0,63 \text{ Wh}$ $E_{sc-req} = 42,6 \text{ Wh}$	$N_{sc-en} = 68$
Tension	$u_{1sc-M} = 15 \text{ V}$ $u_{sc-M} = 45 \text{ V}$	$N_{sc-s} = 3$
Masse	$C.U = 150 \text{ kg}$ $M_h + M_{bob} = 4,4 \text{ kg}$ $M_{pers} = 120 \text{ kg} + 2 \text{ kg}$	$N_{sc-mas} = 47$
Volume	$V_{coffre} = 180 \text{ l}$ $V_h + V_{bob} = 2 \text{ l}$	$N_{sc-vol} = 315$
<b>Choix</b>		$N_{sc} = 45$

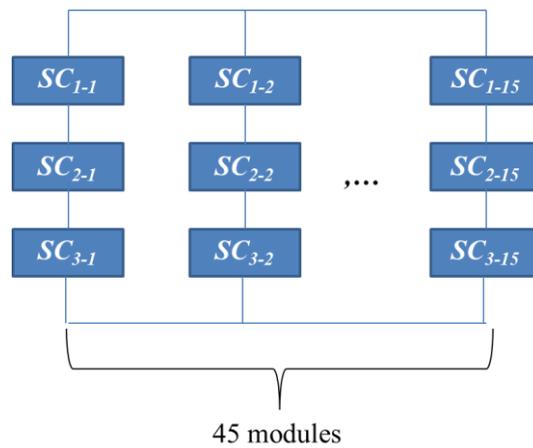


Figure C-6 : Arrangement des SCs

# Annexe D : caractérisation de la batterie de la Tazzari Zero

Cette annexe a pour objectif de présenter la caractérisation du modèle de la batterie du véhicule Tazzari Zéro. La caractérisation a été réalisée par l'intermédiaire de tests expérimentaux effectués au LTE-IFSTTAR, à Bron.

## 1) Modélisation

### a. Modèles envisageables

La modélisation des batteries n'est pas simple. D'une part les caractéristiques des batteries ne sont pas stationnaires et d'autre part ce sont des systèmes non linéaires (par rapport au courant, au SOC, à la température...). Le but est de rendre compte des transferts énergétiques au sein de l'accumulateur. Le choix se porte sur les modèles « circuits électriques équivalents » (interactions entre batterie et autres sous-systèmes sous forme électrique).

Différents modèles de cellules de batteries d'accumulateurs électrochimiques sont décrits dans la littérature. Ces modèles permettent de prendre en compte plusieurs phénomènes. Les surtensions *ohmiques* apparaissent aux hautes fréquences (> 1kHz). Les surtensions dues au *transfert de charges* et au phénomène de *double couche électrochimique* apparaissent entre 1 et 1kHz. Les surtensions de *diffusion* apparaissent en dessous du Hertz. Les principaux modèles couramment utilisés [Johnson 2002], [Montaru 2010].

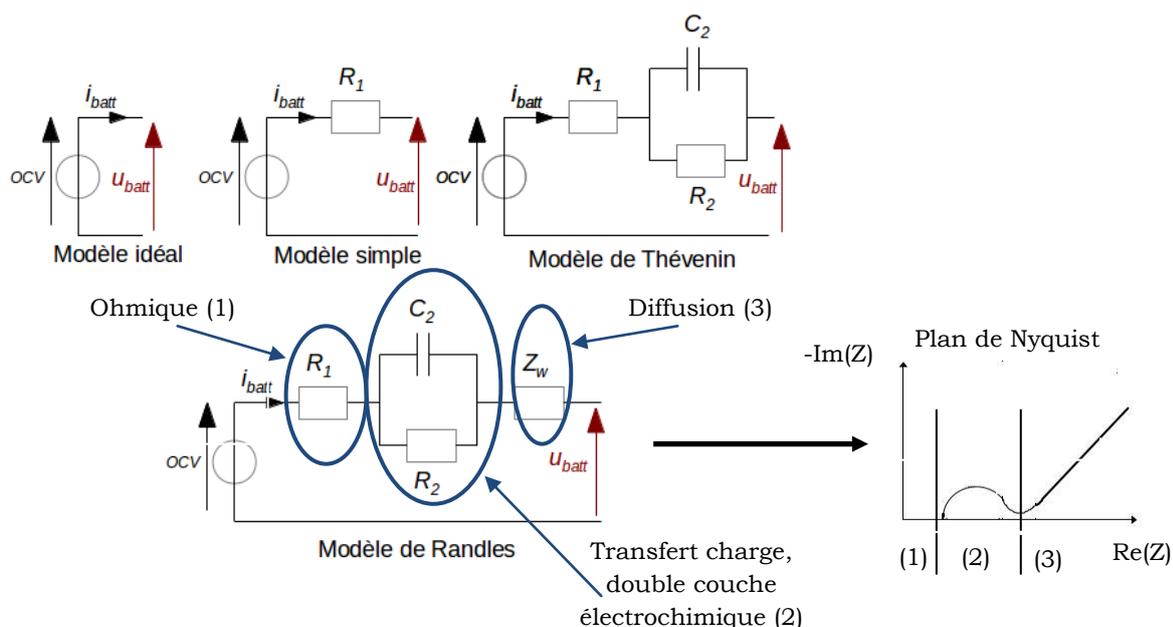


Figure D-1 Modèles de batteries d'accumulateurs électrochimiques

## b. Modèle retenu

Les deux phénomènes prépondérants dans les batteries de type LiFePO<sub>4</sub> sont les surtensions *ohmiques* ainsi que les surtensions de *diffusion* (Figure D-2) [Hellwig 2011]. En effet, en observant la signature fréquentielle d'une cellule de ce type, on remarque que la variation du module de l'impédance complexe est négligeable dans le domaine des surtensions de transfert de charges (Figure D-2). Le modèle retenu prend en compte ces deux phénomènes (Figure D-3). L'impédance du CPE (Constant Phase Element) est définie par la relation (D-1). Le réel  $k$  est compris entre 0 et 1 et le terme  $Q$  est constant [Lario-García 2006]. L'impédance du CPE est une généralisation de l'impédance de Warburg utilisée pour modéliser les phénomènes de diffusion [Kuhn 2006]. Elle peut être représentée par un segment de droite dans le plan de Nyquist.

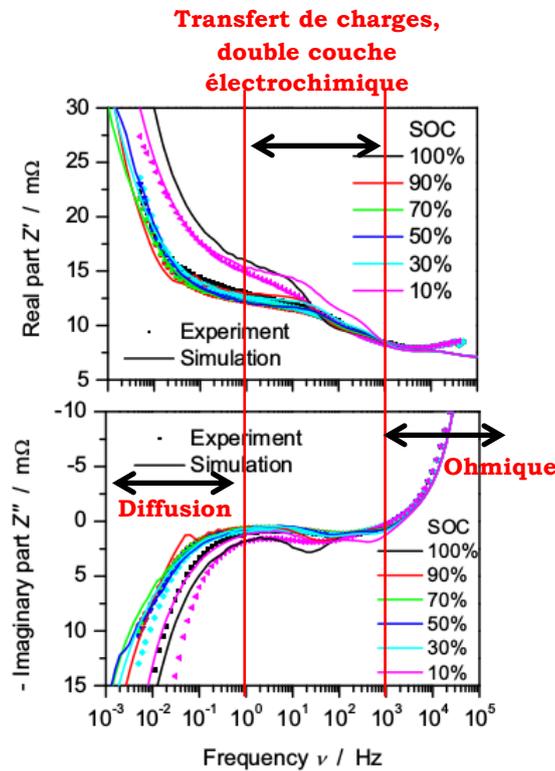


Figure D-2 : Impédance d'une cellule de batterie LiFePO<sub>4</sub> [Hellwig 2011]

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q \cdot (j\omega)^k} \quad k \in [0,1] \quad (D-1)$$

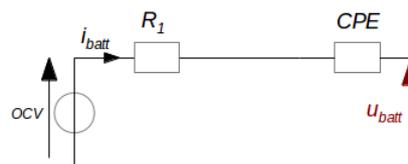


Figure D-3 : Modèle retenu

Les deux éléments sont définis en fonction de l'état de charge de la batterie (SoC). La résistance série varie de plus avec le courant imposé. L'effet de la température extérieure est aussi pris en compte.

## 2) Procédure d'essais

### a. Principaux tests

Les deux principales méthodes d'identification des modèles sont la chronopotentiométrie (méthode temporelle) et la spectroscopie d'impédance (méthode fréquentielle).

#### **Chronopotentiométrie**

La chronopotentiométrie est une méthode d'identification temporelle consistant à appliquer des impulsions de courant et à relever la réponse en tension de la batterie. Cette méthode permet de travailler avec des courants relativement élevés mais est limitée à haute fréquence. Cela requiert en effet des ressources de calcul importantes.

#### **Spectroscopie d'impédance**

La spectroscopie est une méthode fréquentielle qui consiste à déterminer l'impédance complexe de la batterie à différentes fréquences. Cela permet d'obtenir la signature complète de la batterie. Celle-ci est déterminée à SoC constant. Dès lors cette méthode ne permet pas de travailler avec de fortes amplitudes de courants car le SoC peut être largement modifié dans ce cas.

### b. Procédure choisie

La chronopotentiométrie est utilisée afin de caractériser le modèle de la batterie. La procédure d'essais est résumée Figure D-4. Elle est constituée de quatre étapes.

#### **Conditions**

Les essais sont effectués avec une température extérieure e constante de 25 °C.

#### **Rodage et identification de la capacité réelle de la cellule**

A la première utilisation la formation d'une couche de passivation à l'interface de l'électrode de lithium change les propriétés physiques de la cellule. La capacité n'est plus la même. En toute rigueur la capacité est déterminée après plusieurs cycles de charge – décharge à 1C lorsque les résultats convergent. Lors de l'essai, quatre cycles ont été effectués. La cellule a aussi été cyclée au préalable au L2EP à C/3.

#### **Identification de l'OCV**

La seconde étape consiste à déterminer l'OCV (Open Circuit Voltage) de la cellule en charge et en décharge. Il y a deux principales méthodes d'identification de l'OCV. La première consiste à déterminer l'OCV au repos (après une mise au SoC désiré). C'est une

méthode relativement précise mais très coûteuse en temps. En effet les phases de repos peuvent durer 2 h. Il est donc difficile d'avoir beaucoup de points.

La seconde méthode consiste à déterminer directement l'OCV en charge et en décharge à faible courant en négligeant la chute de tension due à la résistance interne de la cellule. Cette méthode permet d'obtenir plus de points. Cependant l'influence du courant est présente dans ce cas. L'idéal est de faire un compromis (temps de test – précision mesure). Ici les essais ont été réalisés à C/5. À partir des courbes de charge et de décharge, une courbe d'OCV moyen est déterminée. Il peut être noté que le cycle d'hystérésis (charge – décharge) peut être négligé dans le cas des batteries Li-ion [Montaru 2009].

### Identification de l'impédance

La résistance série et le CPE sont déterminés par chronopotentiométrie. Des impulsions de courants de différentes amplitudes sont imposées plusieurs états de charge. Ces essais permettent de tenir compte de la non-linéarité des caractéristiques de la batterie (impédance évoluant en fonction du SoC et du courant).

### Validation du modèle

La dernière étape consiste à réaliser des essais de validation du modèle en imposant des profils de courant issus de missions réelles du véhicule.

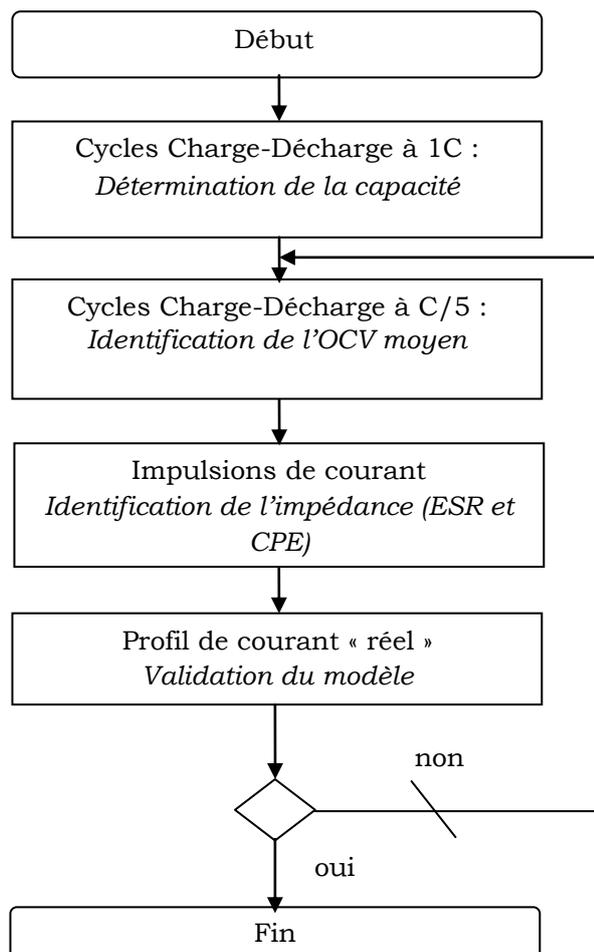


Figure D-4 : Procédure d'essais

### 3) Résultats obtenus

Afin d'assurer le maintien de la température extérieure de la batterie, celle-ci a été placée dans une enceinte thermique.

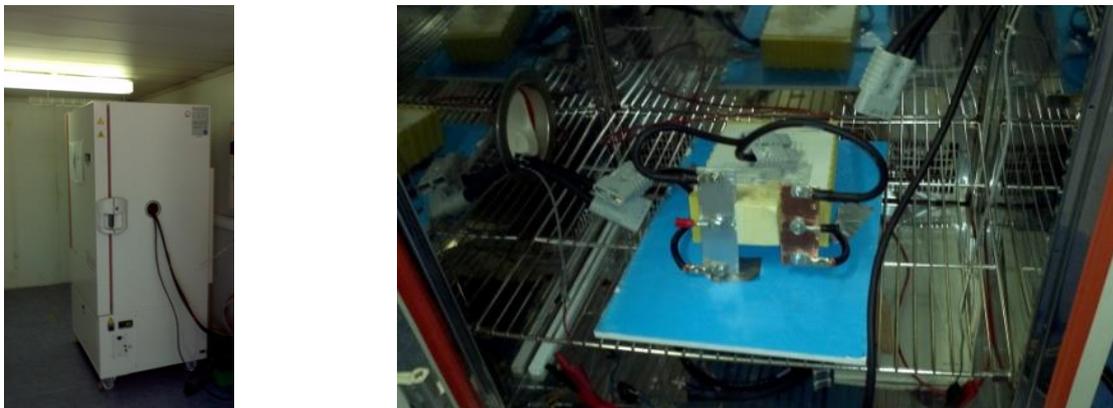


Figure D-5 : enceinte thermique (à gauche) et cellule (à droite) au LTE-IFSTTAR

#### c. Profil complet

Le premier profil d'identification des paramètres est présenté (Figure D-6). Celui-ci dure 70 heures. Il est constitué de cinq phases :

- *Phase 1, thermalisation* : la cellule est maintenue au repos dans l'enceinte thermique pendant 6 h afin de s'assurer de la bonne température de celle-ci.
- *Phase 2, détermination de la capacité* : quatre cycles de charge Constant Current (CC) – Constant Voltage (CV) et de décharge à courant constant ont été réalisés afin de déterminer la capacité réelle de la batterie.
- *Phase 3, détermination de l'OCV* : l'OCV a été déterminé en imposant un courant de C/5 en charge et en décharge.
- *Phase 4, caractérisation de l'impédance* : cette phase correspond à des impulsions de courants de différentes amplitudes et de largeurs variables.
- *Phase 5, réinitialisation du SoC* :

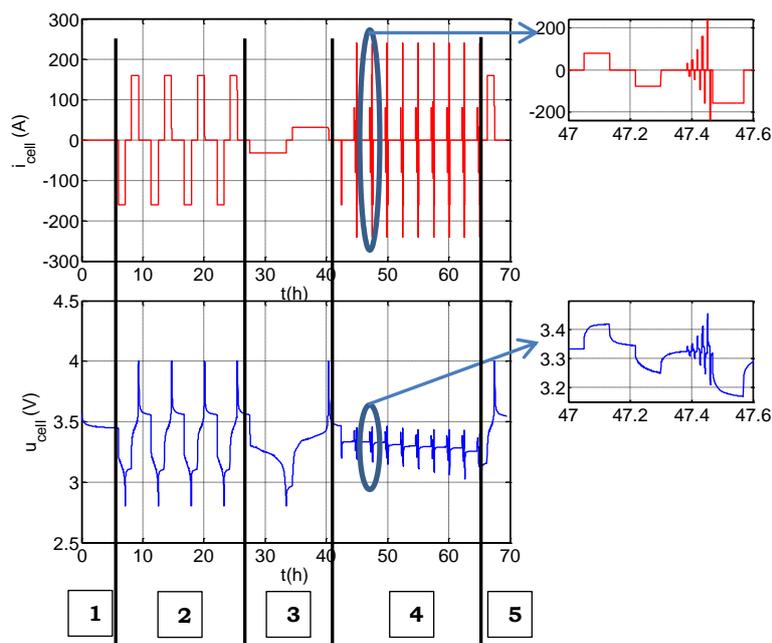


Figure D-6 : Premier profil de test d'identification

#### d. Capacité réelle de la cellule

Les essais de rodage ont permis de déterminer que la capacité réelle de la cellule est un peu plus élevée que celle donnée par le constructeur (180 Ah contre 160 Ah selon le constructeur). La capacité a très peu varié entre le premier et le dernier essai.

#### e. Identification de l'OCV

Une courbe d'OCV moyen est définie à partir des résultats en charge et décharge à C/5 (Figure D-7).

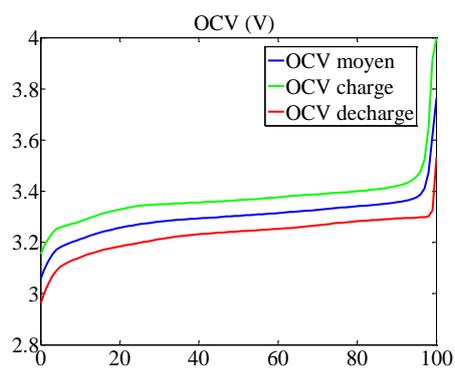


Figure D-7 : Détermination de l'OCV

## f. Paramètres de l'impédance

### Résistance série

La résistance série du modèle est identifiée en charge et décharge à partir d'interpolations des points mesurés (Figure D-8.a).

### Paramètres de l'impédance du CPE

Les paramètres  $Q$  et  $a$  constituant l'impédance du CPE sont déterminés par l'intermédiaire d'un algorithme consistant à minimiser l'erreur entre la réponse mesurée et la réponse simulée aux impulsions de courants correspondant à la phase de diffusion. Les résultats sont présentés Figure D-8.b.

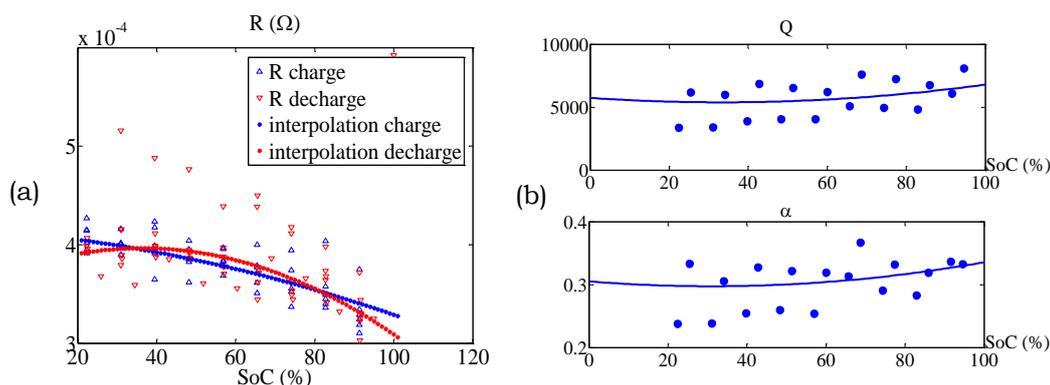


Figure D-8 : (a) identification de la résistance série, (b) identification de l'impédance du CPE

## 4) Validation du modèle

L'instrumentation du véhicule a permis de relever le courant de la batterie sur un trajet mixte (urbain + extra urbain, Figure D-9). Le profil de courant mesuré a été imposé à la cellule et au modèle simulé. Les réponses en tension ont été comparées.

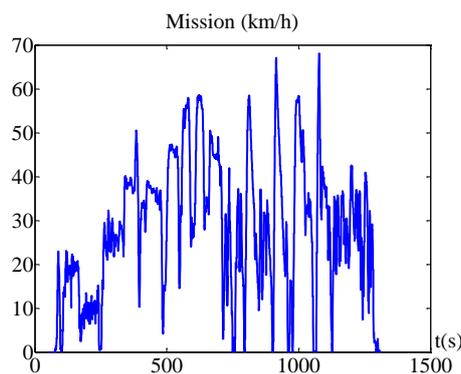


Figure D-9 : Cycle de validation

Les tests ont été effectués à plusieurs niveaux de SoC initiaux. Les résultats du test pour un SoC initial de 74 % sont présentés (Figure D-10). Les réponses en tension de la cellule et du modèle sont quasiment confondues.

Par ailleurs, une erreur peut être observée au début du test à SoC initial de 91% (Figure D-11). Cela correspond à une erreur d'identification de l'OCV dans cette gamme de

SoC. En effet c'est la partie la plus difficile à identifier dans l'évolution de l'OCV en fonction du SoC. Cette partie correspond à un coude (voir Figure D-7). Cependant, cette erreur reste relativement faible (1,5 %).

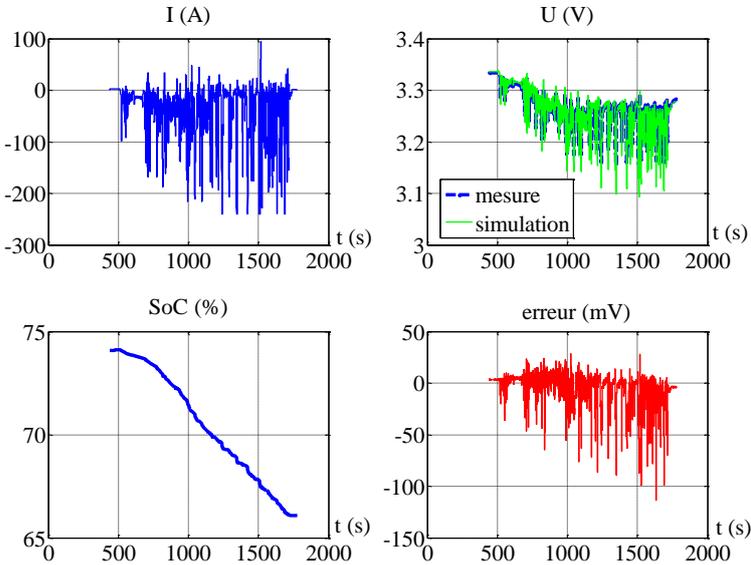


Figure D-10 : test de validation pour un SoC initial de 74 %

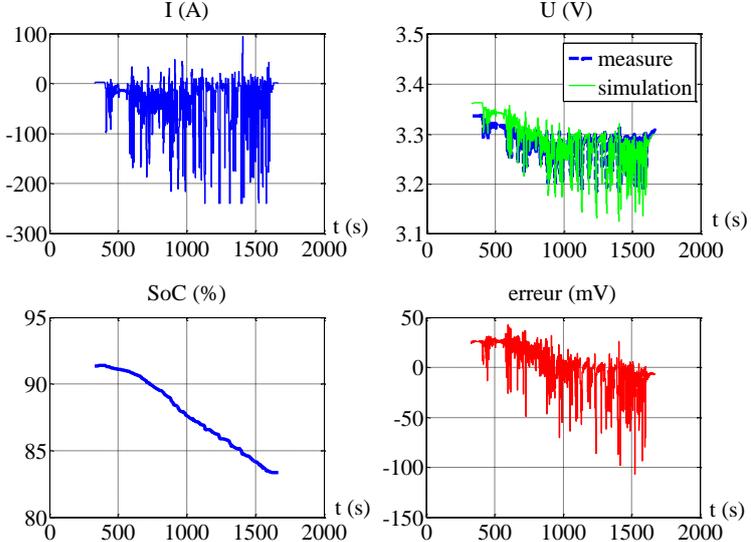


Figure D-11: Test de validation pour un SoC initial de 91 %

# Annexe E : méthode pour la réduction de modèles

## 1) Principe de la réduction de modèle

Plusieurs travaux ont été réalisés sur la réduction de modèles à partir de la REM. Le principe utilisé (Figure E-1) vise à réduire l'ensemble constitué du sous-système et de la structure de commande associée. Dès lors, le résultat de la réduction doit impérativement comporter les mêmes entrées et sorties que l'ensemble d'origine. Les sorties sont des fonctions des entrées (E-1). Deux types de modèles peuvent être définis. Le premier est un modèle statique qui consiste à ne conserver aucune dynamique du sous-système. L'hypothèse est faite que la commande locale est bien réalisée (variable  $y_1$  bien asservie, Figure E-1). Les relations du modèle statique s'expriment par (E-2). A noter que le rendement global  $\eta$  de l'ensemble de sous-système (associé à sa commande) peut être constant ou issu d'une cartographie. Le second type de modèle réduit est quasi-statique. Dans celui-ci la dynamique principale du sous-système en boucle fermée est conservée. Dès lors les relations du modèle s'expriment par (E-3) si la référence  $y_{1-ref}$  est un échelon avec  $\tau_{BF}$  la constante de temps en boucle fermée du sous-système [Letrouvé 2010], [Horrein 2011], [Mayet 2014b].

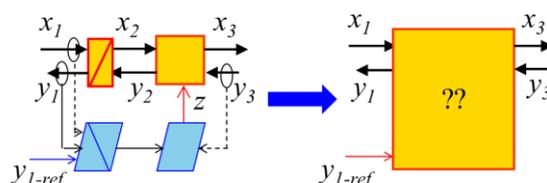


Figure E-1 : principe de la réduction de modèle à partir de la R.E.M

$$\begin{cases} y_1 = f(x_1, y_3, y_{1-ref}) \\ x_3 = g(x_1, y_3, y_{1-ref}) \end{cases} \quad (\text{E-1})$$

$$\begin{cases} y_1 = y_{1-ref} \\ x_3 = \frac{y_{1-ref} x_1 \eta^\gamma}{y_3} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \gamma = 1, y_{1-ref} x_1 > 0 \\ \gamma = -1, y_{1-ref} x_1 \leq 0 \end{cases} \quad (\text{E-2})$$

$$\begin{cases} y_1 = y_{1-ref} (1 - e^{-\tau_{BF} t}) \\ x_3 = \frac{y_{1-ref} x_1 \eta^\gamma}{y_3} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \gamma = 1, y_{1-ref} x_1 > 0 \\ \gamma = -1, y_{1-ref} x_1 \leq 0 \end{cases} \quad (\text{E-3})$$

## 2) Application au cas d'une machine électrique

L'un des cas d'applications les plus utilisés est la machine électrique et sa commande [Letrouvé 2010]. En prenant le cas simple d'une machine à courant continu à aimants permanents alimentée par un convertisseur DC-DC (Figure E-2). Les relations modélisant la machine sont :

$$L_{ind} \frac{d}{dt} i_{ind} = u_h - e_{ind} - r_{ind} i_{ind} \quad (\text{E-4})$$

$$\begin{cases} C_{em} = k_{mcc} i_{ind} \\ e_{ind} = k_{mcc} \Omega_{mcc} \end{cases} \quad (\text{E-5})$$

Dans le cas de l'asservissement du couple électromagnétique  $C_{em}$  de la machine, la REM et la structure de commande de la machine et du convertisseur DC-DC associé sont représentées Figure E-3.a. La REM du modèle réduit est représentée Figure E-3.b. Dans le cas où le modèle est statique, il est régi par les relations exprimées dans (E-6) avec  $\Omega_{mcc}$  la vitesse de rotation de la machine,  $\eta_{mcc}$  le rendement de l'ensemble machine électrique et convertisseur,  $i_h$  le courant à la sortie du convertisseur et  $u_{bus}$  la tension du bus continu. Par ailleurs c'est une conversion électromécanique d'énergie. Dès lors le modèle réduit est représenté par un élément de conversion multi-domaine (ovale).

$$\begin{cases} C_{em} = C_{em-ref} \\ i_h = \frac{\Omega_{mcc} C_{em} \eta_{mcc}}{u_{bus}} \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{mcc} = -1, C_{em} \Omega_{mcc} > 0 \\ \gamma_{mcc} = 1, C_{em} \Omega_{mcc} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{E-6})$$

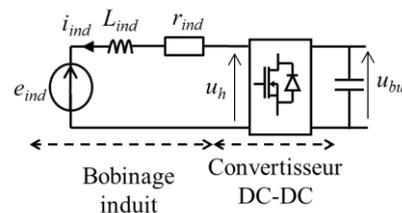


Figure E-2: machine à courant continu et convertisseur

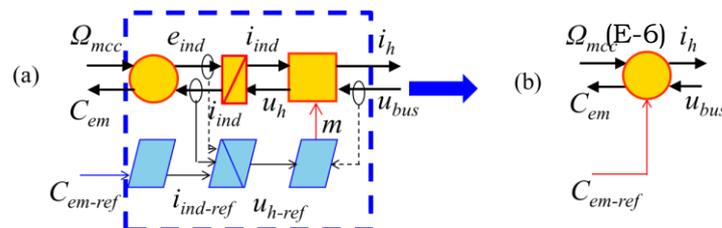


Figure E-3 : application de la MCC, (a) REM et structure de commande, (b) REM du modèle réduit

### 3) Application au véhicule électrique batterie-SCs à deux convertisseurs

La réalisation d'un modèle réduit du système nécessite de répondre à deux questions.

#### 1- Quels éléments peuvent être réduits ?

La REM et la structure de commande du VE batterie-SCs avec deux convertisseurs sont représentées Figure E-4.a. L'élément de couplage doit apparaître après la réduction. En effet, c'est l'élément qui caractérise l'action du degré de liberté de la commande du système (action de la stratégie). La répartition des flux d'énergie entre la batterie et les SCs est mise en évidence par l'élément de couplage.

#### 2- Comment réduire les éléments ?

En faisant l'hypothèse que les courants  $i_{hsc-ref}$  et  $i_{hb-ref}$  sont bien contrôlés, les ensembles bobine de lissage – convertisseur DC-DC peuvent être réduits de la manière présentée dans les parties précédentes. Le principe de la réduction est mis en évidence Figure E-4.a et Figure E-4.b. Les relations (E-7) et (E-8) traduisent le modèle réduit.

$$\begin{cases} u_{sc} i_{Lsc} = u_{bus} i_{hsc} \eta_{gsc} \gamma_{gsc} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{gsc} = -1, i_{Lsc} > 0 \\ \gamma_{gsc} = 1, i_{Lsc} \leq 0 \end{cases} \\ i_{hsc} = i_{hsc-ref} \end{cases} \quad (E-7)$$

$$\begin{cases} u_b i_{Lb} = u_{bus} i_{hb} \eta_{gb} \gamma_{gb} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{gb} = -1, i_{Lb} > 0 \\ \gamma_{gb} = 1, i_{Lb} \leq 0 \end{cases} \\ i_{hb} = i_{hb-ref} \end{cases} \quad (E-8)$$

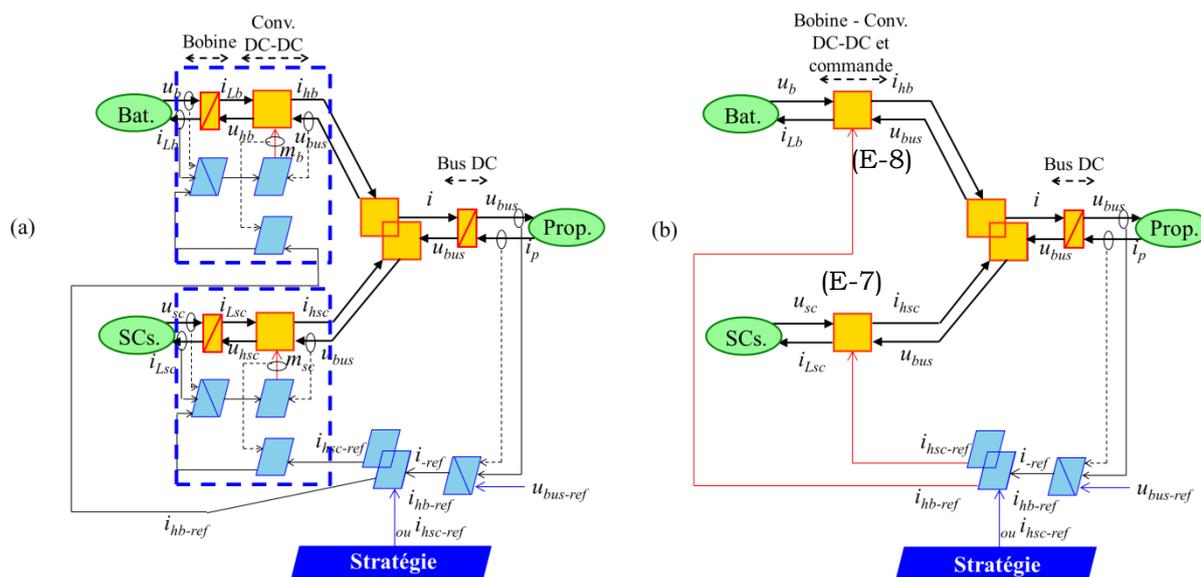


Figure E-4 : REM et structure de commande, (a) modèle complet, (b) modèle réduit

Avec l'hypothèse que les courants  $i_{hsc-ref}$  et  $i_{hb-ref}$  sont bien contrôlés, l'ensemble bus DC et correcteur associé peut-être réduit. En effet les dynamiques liées au courants  $i_{hsc-ref}$  et  $i_{hb-ref}$

sont supérieures à celles liées à la tension du bus DC  $u_{bus}$ . Comme énoncé dans la partie 1), il faut déterminer un élément ayant les mêmes entrées-sorties que l'ensemble à réduire. Le principe est présenté Figure E-5. En considérant que la tension du bus DC est bien contrôlée et avec  $\eta_{bus}$  le rendement du bus DC (pertes dues à la résistance interne), le modèle réduit du bus DC est traduit par (E-9) et (E-10).

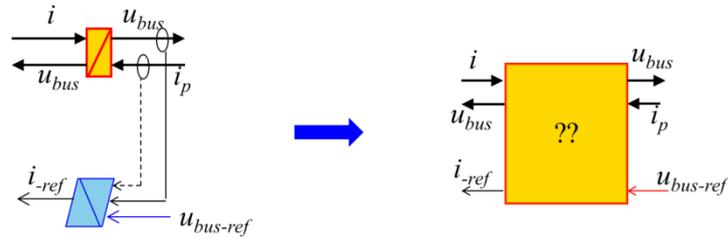


Figure E-5 : Principe de réduction du bus DC et de son correcteur

$$\begin{cases} u_{bus} = u_{bus-ref} \\ u_{bus}i = u_{bus}i_p\eta_{bus}\gamma_{bus} \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{bus} = -1, i_p > 0 \\ \gamma_{bus} = 1, i_p \leq 0 \end{cases} \quad (\text{E-9})$$

Avec les hypothèses sur  $i_{hsc-ref}$  et  $i_{hb-ref}$ :

$$\begin{cases} i = i_{-ref} \\ i_{-ref} = i_p\eta_{bus}\gamma_{bus} \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{bus} = -1, i_p > 0 \\ \gamma_{bus} = 1, i_p \leq 0 \end{cases} \quad (\text{E-10})$$

Pour maintenir la tension  $u_{bus}$  égale à sa référence  $u_{bus-ref}$  les courants  $i_{-ref}$  et  $i_p$  doivent être égaux aux pertes près. La REM et la structure de commande du modèle réduit final sont représentées Figure E-6. Par ailleurs, les modèles réduits correspondent à des conversions d'énergie électrique-électrique (éléments de conversion mono domaine (carrés)).

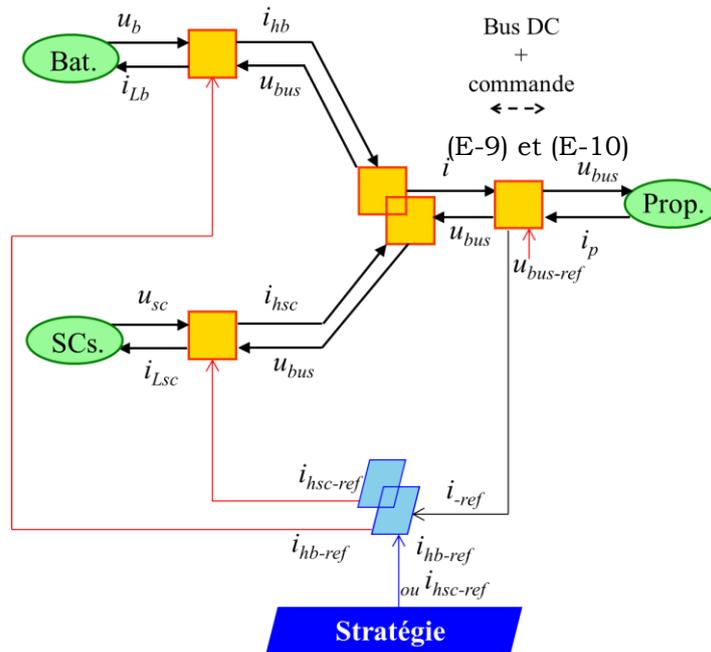


Figure E-6 : REM et structure de commande du modèle réduit final

## Annexe F : détails des calculs pour l'optimisation

Cette annexe donne les principaux détails des calculs pour la résolution du problème de commande optimale pour la synthèse des stratégies développées dans le cadre de la thèse.

### 1) Véhicule batterie-SCs avec un seul convertisseur

#### a. Détermination de la solution optimale

En utilisant le modèle d'optimisation dont la REM et la structure de commande sont représentées Figure F-1, la puissance  $P_{sc}$  aux bornes des SCs est définie par la relation (F-1).

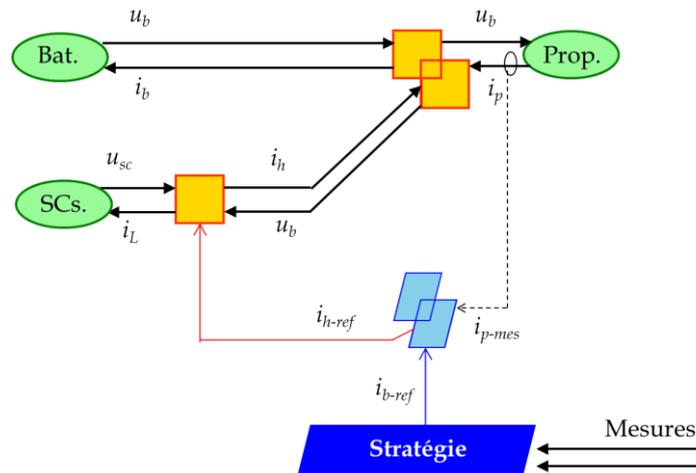


Figure F-1 : REM et structure de commande du modèle réduit du VE batterie-SCs avec un convertisseur

$$P_{sc} = u_b i_h \eta_g^{yg} = (OCV - r_b i_{b\_ref}) (i_p - i_{b\_ref}) \eta_g^{yg} \quad (\text{F-1})$$

Le Hamiltonien est dès lors déterminé par la relation suivante :

$$H(E_{sc}(t), i_{b\_ref}(t), \lambda_{ref}(t)) = i_{b\_ref}^2 - \lambda_{ref} (OCV - r_b i_{b\_ref}) (i_p - i_{b\_ref}) \eta_g^{yg} \quad (\text{F-2})$$

En appliquant les conditions nécessaires d'optimalité :

$$\frac{d}{dt} E_{sc}(t) = -\lambda_{ref} \quad (\text{F-3})$$

$$\frac{d}{dt}\lambda(t) = -\frac{\partial H(E_{sc}(t), i_{b-ref}(t), \lambda_{ref}(t))}{\partial E_{sc}} = 0 \quad (F-4)$$

$$\frac{\partial H(E_{sc}, i_{b-ref}, \lambda)}{\partial i_{b-ref}^*} = 2i_{b-ref}^*(1 - \lambda_{ref}R_b\eta_g^{Yg}) + \lambda_{ref}\eta_g^{Yg}(OCV + r_b i_p) = 0 \quad (F-5)^1$$

Dès lors la trajectoire de  $i_{b-ref}$  donnant l'extremum du Hamiltonien à chaque instant s'exprime par la relation suivante :

$$i_{b-ref}^*(t) = \frac{\lambda_{ref}\eta_g^{Yg}(OCV + r_b i_p)}{2(\lambda_{ref}R_b\eta_g^{Yg} - 1)} \quad (F-6)$$

La condition assurant que l'extremum est un minimum donne :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial i_{b-ref}^{*2}} = 2 - 2\lambda_{ref}r_b\eta_g^{Yg} \geq 0 \quad (F-7)$$

Ce qui revient à :

$$\lambda_{ref}r_b\eta_g^{Yg} < 1 \quad (F-8)$$

## b. Correcteur pour le $\lambda$ -control

Les principes relatifs à la stratégie du  $\lambda$ -control développée dans le cas du véhicule batterie-SCs avec un convertisseur sont donnés. A noter que ce sont les mêmes principes qui ont été utilisés dans le cas des autres véhicules étudiés.

Le  $\lambda$ -control consiste à adapter la valeur du multiplicateur de Lagrange afin de maintenir la tension des SCs entre les bornes désirées. Cela se fait par l'intermédiaire d'une boucle d'asservissement de la tension des SCs. Il y a dès lors, deux paramètres à déterminer ; le correcteur utilisé et la référence à imposer pour la tension des SCs (Figure F-2).

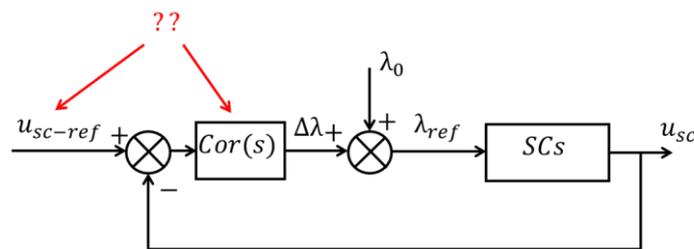


Figure F-2: Structure du  $\lambda$ -control

La première étape consiste à déterminer une relation entre  $\lambda_{ref}$  et  $u_{sc}$ . En considérant un modèle de capacité parfaite  $C_{sc}$  pour les SCs. L'énergie aux bornes des SCs s'exprime par :

<sup>1</sup> « \* » correspond à la trajectoire donnant l'extremum du Hamiltonien

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} u_{sc}^2 \quad (\text{F-9})$$

Avec

$$\frac{d}{dt} E_{sc} = -P_{sc} = -\eta_g^{yg} u_b (i_p - i_{b-ref}) \quad (\text{F-10})$$

En considérant comme modèle de la batterie une source de tension parfaite  $u_b$  (résistance série  $R_b$  nulle):

$$i_{b-ref} = -\frac{\lambda_{ref} \eta_g^{yg} u_b}{2}$$

La relation (F-10) devient :

$$\frac{d}{dt} E_{sc} = -\eta_g^{yg} u_b \left( i_p + \frac{\lambda_{ref} \eta_g^{yg} u_b}{2} \right) \quad (\text{F-11})$$

En faisant apparaître les transformations de Laplace :

$$E_{sc}(s) = -\frac{\eta_g^{yg} u_b I_p}{s} - \lambda_{ref}(s) \frac{(\eta_g^{yg} u_b)^2}{2s} \quad (\text{F-12})$$

Avec (F-9) :

$$U_{sc}^2(s) = -\frac{2\eta_g^{yg} u_b}{C_{sc}s} I_p(s) - \lambda_{ref}(s) \frac{(\eta_g^{yg} u_b)^2}{C_{sc}s} \quad (\text{F-13})$$

Le  $\lambda$ -control va consister ici à contrôler le carré de la tension des SCs par l'intermédiaire d'un correcteur proportionnel de gain  $K_p$  car le système est un intégrateur pur (Figure F-3). Le système en boucle fermée s'exprime par (F-14).

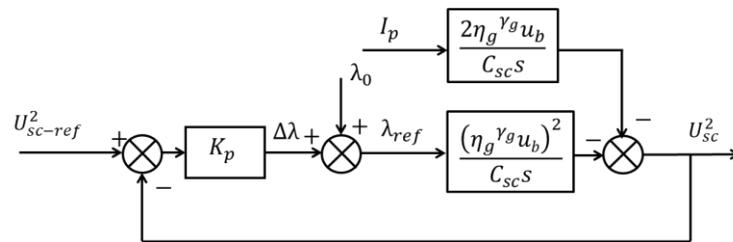


Figure F-3: Schéma du système bouclé

$$\left\{ \begin{aligned} U_{sc}^2(s) &= U_{sc-ref}^2(s) \frac{K_p H_{syst}(s)}{1 + K_p H_{syst}(s)} + \frac{\lambda_0 H_{syst}(s)}{1 + K_p H_{syst}(s)} + \frac{P_{ert}(s)}{1 + K_p H_{syst}(s)} I_p(s) \\ H_{syst}(s) &= -\frac{(\eta_g^{yg} u_b)^2}{C_{sc}s} \\ P_{ert}(s) &= -\frac{2\eta_g^{yg} u_b}{C_{sc}s} \end{aligned} \right. \quad (\text{F-14})$$

En prenant le cas où un échelon de tension (au carré)  $U^2$  est imposé :

$$\begin{cases} U_{sc}^2(s) = \frac{U^2}{s} \frac{K_p H_{syst}(s)}{1 + K_p H_{syst}(s)} + \frac{\lambda_0 H_{syst}(s)}{1 + K_p H_{syst}(s)} + \frac{P_{ert}(s)}{1 + K_p H_{syst}(s)} I_P(s) \\ U_{sc-ref}^2(s) = \frac{U^2}{s} \end{cases} \quad (F-15)$$

Le théorème de la valeur finale donne :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_{sc}^2(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s U_{sc}^2(s) = U^2 + \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s P_{ert}(s)}{1 + K_p H_{syst}(s)} I_P(s) \quad (F-16)$$

Dès lors si un échelon est imposé et que la condition (F-17) est respectée, l'asservissement est bien réalisé.

$$K_p H_{syst}(s) \gg P_{ert}(s) \quad (F-17)$$

Afin d'imposer un échelon, la référence sera imposé en saturant le carré de la tension des SCs entre ses bornes maximale et minimale.

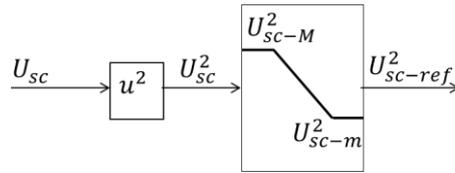


Figure F-4: Définition de la référence pour le  $\lambda$ -control

La génération de l'échelon est représentée Figure F-5.

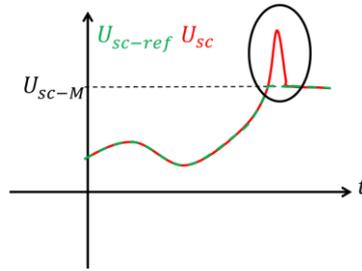


Figure F-5: Illustration de l'échelon pour la référence du  $\lambda$ -control

Le gain du correcteur est calculé avec l'hypothèse que la perturbation est négligeable (F-17).

La fonction de transfert du système en boucle fermée (BF) est définie par :

$$\begin{cases} FTBF(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{K_p A}} \\ A = -\frac{(\eta_g^y u_b)^2}{C_{sc}} \end{cases} \quad (F-18)$$

Le gain du correcteur  $K_p$  s'exprime par en imposant un temps de réponse  $t_{BF}$  en boucle fermée au système.

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{A\tau_{BF}} \\ \tau_{BF} = 3t_{BF} \end{cases} \quad (\text{F-19})$$

## 2) Véhicule batterie-SCs avec deux convertisseurs

En raisonnant sur le modèle d'optimisation (cf. Annexe E) :

$$u_b i_{Lb} = u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{gb} = -1, i_{Lb} > 0 \\ \gamma_{gb} = 1, i_{Lb} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{F-20})$$

Avec le modèle simplifiée de la batterie :

$$(OCV - r_b i_{Lb}) i_{Lb} = u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} \quad (\text{F-21})$$

Dès lors :

$$i_{Lb} = \frac{OCV}{2r_b} \mp \frac{\sqrt{OCV^2 - 4r_b i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} u_{bus}}}{2r_b} \quad (\text{F-22})$$

En considérant  $i_{Lb}$  nul pour  $i_{hb-ref}$  nul, s'expression du courant de la batterie devient :

$$i_{Lb} = \frac{OCV - \sqrt{OCV^2 - 4r_b i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} u_{bus}}}{2r_b} \quad (\text{F-23})$$

Dès lors le critère de performance s'exprime par :

$$J_2 = \sqrt{\frac{1}{T_{cycle}} \int_{t_0}^{t_f} i_{Lb}^2 dt} \quad (\text{F-24})$$

Ce qui revient à :

$$J'_2 = \int_{t_0}^{t_f} i_{Lb}^2 dt \quad (\text{F-25})$$

$$J'_2 = \int_{t_0}^{t_f} \frac{\left(OCV - \sqrt{OCV^2 - 4r_b i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} u_{bus}}\right)^2}{4r_b^2} dt \quad (\text{F-26})$$

Le Hamiltonien est défini par la relation suivante

$$H_2(E_{sc}(t), i_{hb-ref}(t), \lambda(t)) = \frac{\left(OCV - \sqrt{OCV^2 - 4r_b i_{hb-ref} \eta_{gb}^{Y_{gb}} u_{bus}}\right)^2}{4r_b^2} - \lambda(t) P_{sc}(t) \quad (F-27)$$

Avec :

$$P_{sc}(t) = u_{bus} (i_p \eta_{bus}^{Y_{bus}} - i_{hb-ref}) \eta_{gsc}^{Y_{gsc}} \quad (F-28)$$

Les conditions nécessaires d'optimalité s'expriment par :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} E_{sc}(t) = \frac{\partial H}{\partial \lambda} \\ \frac{d}{dt} \lambda(t) = 0 \end{cases} \quad (F-29)$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial i_{hb-ref}^*} = 0 \quad (F-30)$$

Avec la condition (II-26) et en faisant intervenir le paramètre  $\lambda_{ref}$  du  $\lambda$ -control :

$$i_{hb-ref}^* = \frac{OCV^2 \left( 2\eta_{gb}^{Y_{gb}} \eta_{gsc}^{Y_{gsc}} \lambda_{ref} - r_b \eta_{gsc}^{2Y_{gsc}} \lambda_{ref}^2 \right)}{u_{bus} \left( 4r_b^2 \eta_{gb}^{Y_{gb}} \eta_{gsc}^{2Y_{gsc}} \lambda_{ref}^2 - 8\eta_{gb}^{2Y_{gb}} \eta_{gsc}^{Y_{gsc}} \lambda_{ref} r_b + 4\eta_{gb}^{2Y_{gb}} \right)} \quad (F-31)$$

La résolution des conditions nécessaire d'optimalité a été vérifiée par l'intermédiaire d'un logiciel libre de calcul formel, [Maxima]<sup>1</sup>.

### 3) Véhicule PàC-SCs avec deux convertisseurs

Le critère de performance s'exprime par :

$$J_3 = \sqrt{\frac{1}{T_{cycle}} \int_{t_0}^{t_f} i_{Lfc}^2 dt} \quad (F-32)$$

Cela est équivalent à :

$$J'_3 = \int_{t_0}^{t_f} i_{Lfc}^2 dt \quad (F-33)$$

En raisonnant sur le modèle d'optimisation :

---

<sup>1</sup> <http://maxima.sourceforge.net/>, dernière consultation Juillet 2015

$$u_{fc} i_{Lfc} = u_{bus} i_{hfc-ref} \eta_{gfc} \quad (F-34)$$

$$P_{sc}(t) = u_{bus} (i_p \eta_{bus} \gamma_{bus} - i_{hfc-ref}) \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} \quad (F-35)$$

Le Hamiltonien  $H_3$  est défini par la relation suivante :

$$\begin{cases} H_3(E_{sc}(t), i_{hfc-ref}(t), \lambda_{ref}(t)) = \left( \frac{u_{bus} \eta_{gfc}}{u_{fc}} \right)^2 i_{hfc-ref}^2 + \lambda_{ref}(t) \frac{d}{dt} E_{sc} \\ \frac{d}{dt} E_{sc} = -P_{sc}(t) \end{cases} \quad (F-36)$$

En considérant le rendement interne  $\eta_{bus}$  du bus DC comme étant unitaire, la valeur optimale de la référence du courant du convertisseur de la PàC est donnée par la résolution de la relation (F-37).

$$\frac{\partial H_3}{\partial i_{hfc-ref}^*} = 0 \quad (F-37)$$

Dès lors :

$$i_{hfc-ref}^* = -\frac{\lambda_{ref} u_{fc}^2 \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}}}{2 \eta_{gfc}^2 u_{bus}} \quad (F-38)$$

#### 4) Véhicule PàC-batterie-SCs, approche globale

En raisonnant sur le modèle d'optimisation :

$$u_b i_{Lb} = u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} \text{ avec } \begin{cases} \gamma_{gb} = -1, i_{Lb} > 0 \\ \gamma_{gb} = 1, i_{Lb} \leq 0 \end{cases} \quad (F-39)$$

$$i_{Lb}^2 = \left( \frac{u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 \quad (F-40)$$

Le critère de performance s'exprime par :

$$J_4 = \int_{t_0}^{t_f} \left( a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c + A_b \left( \frac{u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 \right) dt \quad (F-41)$$

Le Hamiltonien  $H_4$  s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
H_4 & \left( E_b(t), E_{sc}(t), i_{hfc-ref}(t), i_{hb-ref}(t), \lambda_{ref}(t) \right) \\
& = a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c \\
& + A_b \left( \frac{u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 + \lambda_{sc-ref}(t) \frac{d}{dt} E_{sc} + \lambda_{b-ref}(t) \frac{d}{dt} E_b
\end{aligned} \tag{F-42}$$

D'après les conventions utilisées :

$$\frac{d}{dt} E_{sc}(t) = -u_{bus} (i_p - i_{hb-ref} - i_{hfc-ref}) \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} \tag{F-43}$$

$$\frac{d}{dt} E_b(t) = -u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}} \tag{F-44}$$

Le Hamiltonien est exprimé sous forme de somme pondérée de puissance  $H_{4p}$  :

$$\begin{aligned}
H_{4p} = PCI & \left[ a \left( \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} \right)^2 + b \frac{u_{bus} i_{hfc-ref}}{\eta_{gfc}} + c \right] + B_b r_b \left( \frac{u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}}{u_b} \right)^2 \\
& - s_{sc-ref} u_{bus} (i_p - i_{hb-ref} - i_{hfc-ref}) \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} - s_{b-ref} u_{bus} i_{hb-ref} \eta_{gb}^{\gamma_{gb}}
\end{aligned} \tag{F-45}$$

Les conditions nécessaires d'optimalité s'expriment par :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} E_{sc}(t) = -s_{sc-ref} \\ \frac{d}{dt} E_b(t) = -s_{b-ref} \end{cases} \tag{F-46}$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} s_{sc-ref} = -\frac{\partial H_p}{\partial E_{sc}} = 0 \\ \frac{d}{dt} s_{b-ref} = -\frac{\partial H_p}{\partial E_b} = 0 \end{cases} \tag{F-47}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H_p}{\partial i_{hfc-ref}^*} = 0 \\ \frac{\partial H_p}{\partial i_{hb-ref}^*} = 0 \end{cases} \tag{F-48}$$

D'après la condition (F-48) (« \* » correspond aux trajectoires donnant l'extremum de  $H_{4p}$ ) :

$$i_{hfc-ref}^* = -\frac{\eta_{gfc}^2 \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} s_{sc-ref} + \eta_{gfc} b PCI}{2a PCI u_{bus}} \tag{F-49}$$

$$i_{hb-ref}^* = \frac{(\eta_{gb}^{\gamma_{gb}} s_{b-ref} - \eta_{gsc}^{\gamma_{gsc}} s_{sc-ref}) u_b^2}{2B_b \eta_{gb}^{2\gamma_{gb}} r_b u_{bus}} \quad (F-50)$$

## 5) Véhicule PàC-GE-batterie-SCs

Le critère de performance  $J_6$  s'exprime par :

$$J_6 = \int_{t_0}^{t_f} (a_{ge} (u_{bus} k_R i_{-ref})^2 + b_{ge} u_{bus} k_R i_{-ref} + c_{ge}) dt \quad (F-51)$$

Le Hamiltonien  $H_{6p}$  s'exprime par :

$$\begin{aligned} H_6(E_{ge}(t), k_R(t), \lambda_{ge-ref}(t)) \\ = (a_{ge} (u_{bus} k_R i_{-ref})^2 + b_{ge} u_{bus} k_R i_{-ref} + c_{ge}) + \lambda_{ge-ref}(t) \frac{d}{dt} E_{ge} \end{aligned} \quad (F-52)$$

Le Hamiltonien s'exprime sous forme de somme pondérée de puissance (ECMS) par (F-53) avec  $PCI_{carb}$  le pouvoir calorifique inférieur de l'essence.

$$\begin{aligned} H_{6p}(E_{ge}(t), k_R(t), s_{ge-ref}(t)) \\ = PCI_{carb} (a_{ge} (u_{bus} k_R i_{-ref})^2 + b_{ge} u_{bus} k_R i_{-ref} + c_{ge}) + s_{ge-ref}(t) \frac{d}{dt} E_{ge} \end{aligned} \quad (F-53)$$

Avec

$$\begin{cases} s_{ge-ref} = \lambda_{ge-ref} PCI_{carb} \\ \frac{d}{dt} E_{ge} = -u_{bus} k_R i_{-ref} \end{cases} \quad (F-54)$$

Les conditions nécessaires d'optimalité donnent :

$$\frac{\partial H_{6p}}{\partial k_R^*} = PCI_{carb} (2a_{ge} (u_{bus} i_{-ref})^2 k_R + b_{ge} u_{bus} i_{-ref}) - s_{ge-ref} u_{bus} i_{-ref} = 0 \quad (F-55)$$

L'expression optimale de la variable de commande  $k_R$  s'exprime par :

$$k_R^* = \frac{s_{ge-ref} - PCI_{carb} b_{ge}}{2PCI_{carb} a_{ge} i_{-ref} u_{bus}} \quad (F-56)$$

# Annexe G : dimensionnement du système PàC

Cette annexe présente la procédure de dimensionnement du système PàC utilisé dans le cas des véhicules étudiés. La méthode est basée sur des critères heuristiques.

## 1) Puissance requise

Cette étape consiste à déterminer le nombre de stack nécessaire  $N_{stack}$  de la PàC. Celui-ci est déterminé par un critère relatif à la puissance requise. La PàC doit pouvoir assurer un fonctionnement en mode dégradé du véhicule en cas de perte des sources secondaires. Le mode dégradé ici consiste à assurer au véhicule une vitesse de 50 km/h (jusqu'au garage). La puissance  $P_{prop-d}$  appelée par le véhicule dans ces conditions est déterminée par la simulation du véhicule sous son Poids Maximale Autorisé en Charge (PTAC). La simulation est réalisée dans le cas d'une accélération du véhicule de 0 à 50 km/h en 10 secondes sans vent et avec une pente nulle (Figure G-1). Le nombre de stack est alors déduit de la puissance maximale  $P_{1stack-M}$  d'un stack et de  $P_{prop-M}$  par la relation (G-1). Le stack de référence est issu de la littérature [Corbo 2011].

$$N_{stack} = \frac{P_{prop-M}}{P_{1stack-M}} \quad (G-1)$$

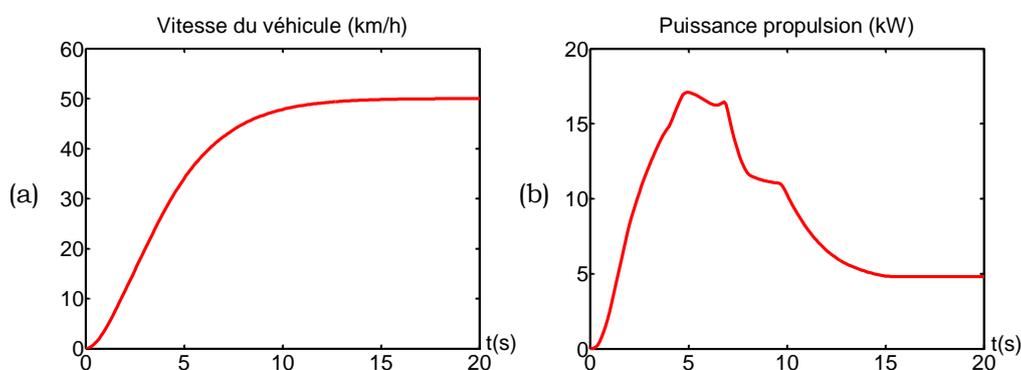


Figure G-1: accélération en mode dégradé, (a) vitesse du véhicule, (b) puissance du système de propulsion

## 2) Energie requise

Cela consiste à dimensionner le système de stockage de  $H_2$  nécessaire. Celui-ci est relatif à l'autonomie du véhicule. L'autonomie désirée du véhicule est de 500 km. La masse de  $H_2$  nécessaire  $M_{comb-req}$  est déterminée par une simulation du véhicule sous son PTAC. La simulation est effectuée sur plusieurs cycles WLTC classe 2 (phase basse vitesse, cf. Figure G-2) pour une distance totale de 500 km. Le système de stockage de référence est un des

réservoirs de la Toyota Mirai (Figure G-3). Celui-ci peut stocker 2,5 kg de H<sub>2</sub> sous une pression de 700 bars et pour un volume total de 60 l. Il s'agit dès lors de déterminer si le système de stockage répond aux contraintes de masse et de volume du véhicule. La considération est faite que l'ensemble du système PàC est situé en lieu et place de la batterie d'origine. En ce qui concerne la masse, le système global doit avoir une masse inférieure à celle de la batterie d'origine (G-2). La contrainte de volume impose que le stack et le système de stockage ait un volume inférieur à celui de la batterie d'origine (G-3). A noter que ce dimensionnement est sous-évalué. En effet, les auxiliaires ne sont pas pris en compte.

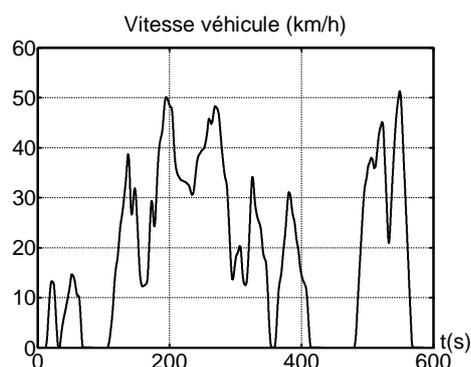


Figure G-2: Cycle WLTC classe 2 (phase basse vitesse)

$$M_{réservoir} + M_{stack} \leq M_b \quad (G-2)$$

$$V_{stack} + V_{réservoir} \leq V_b \quad (G-3)$$

La synthèse du dimensionnement du système PàC est présentée Tableau G-1.

Tableau G-1 : synthèse du dimensionnement du système PàC

Critère	Contraintes	Choix
<b>Puissance</b>	$P_{1stack-M} = 20 \text{ kW}$ $P_{prop-M} = 17 \text{ kW}$	$N_{stack} = 1$
<b>Energie</b>	$M_{comb-req} = 2,54 \text{ kg}$ $M_{réservoir} = 44 \text{ kg}$ $M_{stack} = 24 \text{ kg}$ $M_b = 134,4 \text{ kg}$ $V_{stack} = 14 \text{ l}$ $V_{stockage} = 60 \text{ l}$ $V_b = 89,91$	Validé

<b>MECHANICAL</b>	
<b>FUEL CELL SYSTEM</b>	
Name	Toyota Fuel Cell System (TFCS)
<b>FUEL CELL STACK</b>	
Name	Toyota FC Stack
Fuel Cell Stack Type	Solid polymer electrolyte fuel cell
Humidification System	Internal circulation system (humidifier-less)
Power Output	153 HP (114 kW) MAX
Output Density	By Volume: 3.1 kW/L By Weight: 2.0 kW/kg
Cell	Number of cells in one stack: 370 (single-line stacking) Thickness: 1.34 mm Weight: 102 g Flow Channel: 3D fine-mesh flow field (cathode)
Emission Rating	Zero Emissions Vehicle (ZEV)
<b>ELECTRIC MOTOR</b>	
Motor Type	AC synchronous electric generator
Power Output	151 HP (113 kW) MAX
Peak Torque	247 lb-ft (335 N-m)
<b>HYDROGEN TANKS</b>	
Storage Method	Carbon fiber high-pressure tanks
Number of Tanks	2
Type	Type-4
Material	Three layer structure: Inner layer: plastic liner (prevents hydrogen leakage) Middle layer: carbon fiber reinforced plastic (structural element) Surface layer: glass fiber reinforced plastic (protects outer surface from abrasion)
Fuel	Compressed hydrogen gas
Maximum Filling Pressure	87.5 MPa
Normal Operating Pressure	70 MPa (approx. 10,000 psi)
Storage Density (Capacity)	5.7 weight %
Internal Volume	122.4 L Front: 60.0 L Rear: 62.4 L
Hydrogen Storage Mass	Approx. 5.0 kg
Refueling Time	About 5 minutes

Figure G-3: Données constructeur de la Toyota Mirai (<http://toyotanews.pressroom.toyota.com/>)

# Annexe H : dimensionnement pour le véhicule PàC-batterie-SCs

Dans le cas du véhicule PàC-batterie SCs, la batterie et les SCs sont dimensionnés par rapport à des critères de puissance et d'énergie. La méthode de dimensionnement présentée en Annexe C est utilisée (méthode heuristique).

## 1) Puissance requise

La batterie et les SCs doivent pouvoir fournir la puissance maximale  $P_{prop-M}$  appelée par le système de propulsion. Celle-ci a été déterminée par l'intermédiaire de tests sur route du véhicule (cf. § II.1). Dès lors, le nombre de SCs nécessaire en puissance  $N_{sc-pui}$  ainsi que le nombre de cellules de batterie nécessaire  $N_{b-pui}$  pour ce critère sont déterminés par (H-1) et (H-2) avec  $P_{1sc-M}$  et  $P_{1b-M}$  respectivement la puissance maximale d'un SC et d'une cellule de batterie. A noter que les cellules de batterie de référence ne sont plus celles du véhicule d'origine. En effet, des cellules de plus faibles capacité ont été choisies pour le dimensionnement du nouveau véhicule. Ce sont toujours des de type LFP du constructeur A123®. Les caractéristiques principales d'une cellule de batterie sont données Tableau H-2.

$$N_{sc-pui} \geq \frac{P_{prop-M}}{P_{1sc-M}} \quad (H-1)$$

$$N_{b-pui} \geq \frac{P_{prop-M}}{P_{1b-M}} \quad (H-2)$$

## 2) Energie requise

Cela nécessite de déterminer un profil de puissance  $P_{sc-req}$  des SCs et  $P_{b-req}$  de la batterie sur l'horizon du cycle de conduite considéré. Les deux profils de puissances sont déterminés dans le cas de l'application d'une stratégie de filtrage sur le cycle. Le cycle de conduite choisi est la phase basse vitesse d'un cycle WLTC classe 2 (cf. Annexe C). Les « basses » fréquences du courant du système de propulsion sont imposées à la PàC, les « moyennes » fréquences à la batterie et les « hautes » fréquence aux SCs (Figure H-1). Les valeurs des fréquences  $f_c$  et  $f_b$  sont définies par rapport à des travaux effectués dans la littérature [Thounthong 2009b], [Azib 2014]. Le nombre  $N_{sc-en}$  de SCs nécessaire et le nombre  $N_{b-en}$  de cellule de batteries nécessaire en énergie sont définis par (H-3) et (H-5), avec  $E_{sc-req}$  et  $E_{b-req}$  les profils d'énergie requis respectivement par les SCs et la batterie. Par ailleurs, des profondeurs de décharges maximales sont introduites pour chaque source. Le lecteur pourra se référer à l'expression de l'énergie maximale  $E_{1sc-M}$  d'un SCs, avec la prise en compte de la profondeur de décharge

maximale admise, donnée Annexe C. L'énergie maximale  $E_{1b-M}$  d'une cellule de batterie, s'exprime en fonction de la capacité nominale  $C_{1b-n}$  de la cellule, de sa tension nominale  $u_{1b-n}$ , ainsi que de la profondeur de décharge maximale  $DoD_{1b-M}$  admise par (H-4). La profondeur de décharge de la cellule s'exprime en fonction du courant  $i_b$  qui la traverse (convention générateur).

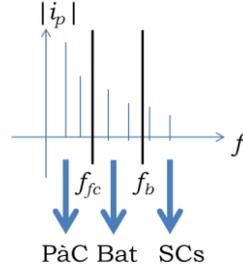


Figure H-1 : illustration de la stratégie de filtrage à partir du spectre en fréquence du courant du système de propulsion

$$\begin{cases} N_{sc-en} \geq \frac{\Delta E_{sc-req}}{E_{1sc-M}} \\ \Delta E_{sc-req} = \max(E_{sc-req}) - \min(E_{sc-req}) \end{cases} \quad (H-3)$$

$$\begin{cases} E_{1b-M} = 3600 C_{1b-n} u_{1b-n} \frac{DoD_{b-M}}{100} \\ DoD_{b-M} = 100 \left( 1 - \frac{\int_{(T)} -i_b dt}{C_{1b-n}} \right) \end{cases} \quad (H-4)$$

$$\begin{cases} N_{b-en} \geq \frac{\Delta E_{b-req}}{E_{1b-M}} \\ \Delta E_{b-req} = \max(E_{b-req}) - \min(E_{b-req}) \end{cases} \quad (H-5)$$

### 3) Contraintes d'implantation

Des contraintes de masse et de volume sont prises en compte. La somme de la masse à vide du véhicule  $M_{veh0}$  et de l'ensemble des masses des autres éléments doit être inférieure au P.T.A.C (Poids Total Autorisée en Charge) du véhicule (H-6). La considération est faite que la masse du banc de SCs et celle de la batterie sont les mêmes. Concernant le volume, la considération est faite que la batterie, les SCs et les convertisseurs associés seront installés dans le coffre. Dès lors, la contrainte de volume se traduit par (H-7). La prise en compte des contraintes de masse et de volume est illustrée Figure H-2. Par ailleurs la considération est faite que la batterie et les SCs ont le même volume.

$$M_{veh0} + M_{fc} + M_{sc} + M_b + M_h + M_{bob} + M_{pers} \leq P.T.A.C \quad (H-6)$$

$$V_h + V_{bob} + V_{sc} + V_b \leq V_{coffre} \quad (H-7)$$

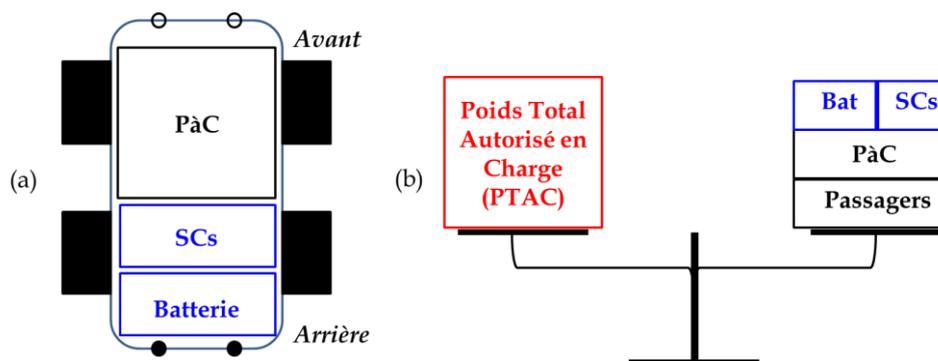


Figure H-2 : principe du dimensionnement de la batterie, (a) volume, (b) masse

#### 4) Tension

Le nombre d'éléments en série est conditionné par la tension désirée aux bornes des ensembles. La tension nominale désirée  $u_{sc-nom}$  pour les SCs est de 45 V. La tension nominale désirée  $u_{b-nom}$  pour la batterie est de 40 V (minimale). Dès lors, le nombre de SCs nécessaire en série  $N_{sc-s}$  (H-8) ainsi que le nombre de cellules de batterie nécessaire en série  $N_{b-s}$  (H-9) sont déterminés par l'intermédiaire de la tension nominale au bornes d'un élément de SC et de batterie, respectivement  $u_{1sc-nom}$  et  $u_{1b-nom}$ .

$$N_{sc-s} \geq \frac{u_{sc-nom}}{u_{1sc-nom}} \quad (H-8)$$

$$N_{b-s} \geq \frac{u_{b-nom}}{u_{1b-nom}} \quad (H-9)$$

La synthèse des résultats est donnée dans le Tableau H-1. Afin de répondre à tous les critères, le choix se porte vers **39** modules de SCs (13 branches de 3 modules en série) et **24** cellules de batterie (2 branches de 12 cellules en série).

Tableau H-1 : synthèse du dimensionnement de la batterie et des SCs

Elément	Puissance	Energie	Masse	Volume	Tension
<b>Batterie</b>	$P_{prop-M} = 22 \text{ kW}$	$\Delta E_{b-req} = 16 \text{ Wh}$	$M_{sc} + M_b = 83 \text{ kg}$	$V_{sc} + V_b = 177 \text{ l}$	$u_{b-nom} = 40 \text{ V}$
	$P_{1b-M} = 1,2 \text{ kW}$	$E_{1b-M} = 6,6 \text{ Wh}$	$M_{1b} = 0,48 \text{ kg}$	$V_{1b} = 0,26 \text{ l}$	$u_{1b-nom} = 3,3 \text{ V}$
	$N_{b-pui} = 20$	$N_{b-en} = 3$	$N_{b-masse} = 87$	$N_{b-vol} = 340$	$N_{b-s} = 12$
<b>SCs</b>	$P_{1sc-M} = 1,14 \text{ kW}$	$\Delta E_{sc-req} = 23 \text{ Wh}$	$M_{sc} + M_b = 83 \text{ kg}$	$V_{sc} + V_b = 177 \text{ l}$	$u_{sc-nom} = 45 \text{ V}$
	$N_{sc-pui} = 21$	$E_{1sc-M} = 0,63 \text{ Wh}$	$M_{1sc} = 0,5 \text{ kg}$	$V_{1sc} = 0,57 \text{ l}$	$u_{1sc-nom} = 15 \text{ V}$
		$N_{sc-en} = 38$	$N_{sc-masse} = 84$	$N_{sc-vol} = 155$	$N_{sc-s} = 3$

Tableau H-2 : caractéristiques principales d'une cellule de batterie ([www.buya123products.com](http://www.buya123products.com))

Specification	Value	Notes/Comments
Nominal Capacity	20 Ah	
Minimum Capacity	19.5 Ah	25 °C, 6A Discharge, 3.6V to 2.0V, at BOL
Nominal Voltage	3.3V	@ 50% SOC
Voltage Range	2.0 to 3.6V	Fully Discharged to Fully Charged
Absolute Maximum terminal voltage	4.0	Above which will cause immediate damage to the cell
Recommended maximum charge voltage	3.6V	
Recommended float charge voltage	3.5V	
Recommended end of discharge cutoff	2.0V	
Recommended standard charge current	20A	to 3.6V
Recommended maximum charge current	100A	to 3.6V , Cell temperature < +85 °C
Pulse 10s charge current	200A	23 °C ≤ Tcell < +85 °C, Vcell < 3.8V
Maximum discharge continuous current	200A	23 °C ≤ Tcell < +85 °C, SOC = 50%
Pulse 10s discharge current	600A	23 °C ≤ Tcell < +85 °C, SOC = 50%

## Annexe I : éléments de gestion d'énergie d'un véhicule MCI-batterie-SCs

Cette annexe présente la manière d'aborder le cas d'un véhicule hybride parallèle à trois sources, système MCI, batterie, SCs en appliquant la méthodologie proposée dans le cadre de la thèse.

### Objectifs et priorité des sources

Les points développés dans le mémoire sont illustrés par la suite en prenant l'exemple d'un véhicule hybride parallèle constitué d'un système MCI, d'une batterie et d'un banc de SCs (Figure I-1). Cette architecture est intéressante car elle comporte deux types de connexion entre les sources. Cela est représenté par la REM du véhicule avec l'apparition de deux éléments de couplage (Figure I-2). Le premier élément de couplage (en partant de la gauche) représente une connexion électrique entre la batterie et les SCs. Le second élément de couplage correspond à une connexion mécanique entre la boîte de vitesses et l'arbre de la machine électrique. Les différents objectifs des sources sont donnés Tableau I-1. L'objectif de l'association de la batterie et des SCs au système MCI est de réduire la consommation de carburant du MCI. La batterie et les SCs ont un objectif interne commun (optimisation des flux d'énergie du MCI). Par conséquent, la batterie, les SCs et la commande associée sont regroupées dans une source équivalente.

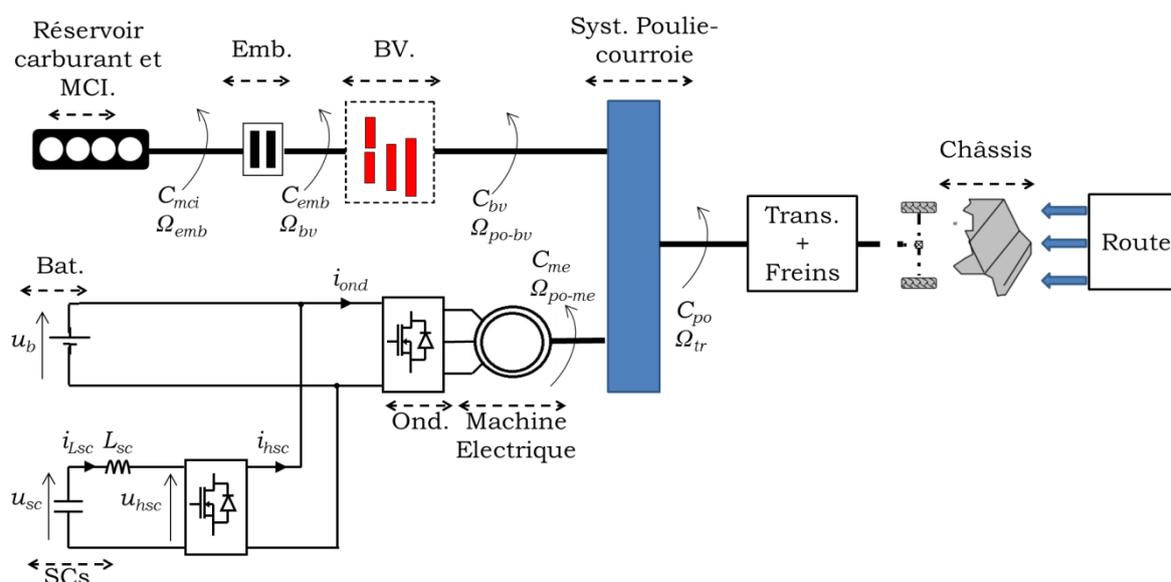


Figure I-1 : véhicule hybride parallèle à trois sources

Tableau I-1: objectifs de l'association système MCI-batterie-SCs

Source	Objectif(s) interne(s)	Priorité
Système MCI	-	Principale
batterie	Optimiser les flux d'énergie du système MCI	Secondaire
SCs	Limiter les sollicitations de la batterie optimiser les flux d'énergie du système MCI	Secondaire

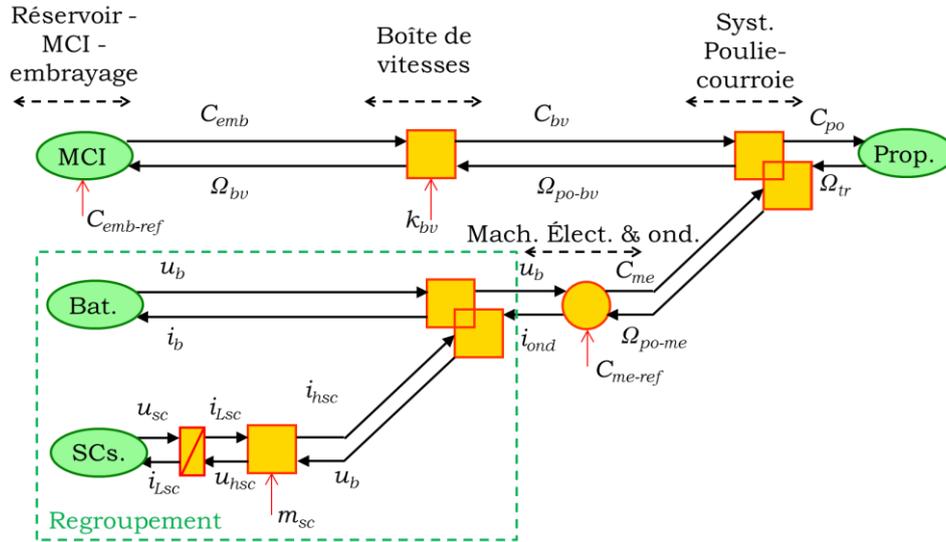


Figure I-2 : REM du VH parallèle à trois sources

### Optimisation : choix des variables

Dans le cas du VH parallèle, les sources secondaires sont la batterie et les SCs. Par conséquent, dans le cas de l'utilisation d'une stratégie à base d'optimisation pour la gestion du système global (MCI-source équivalente batterie-SCs), la variable d'état est l'énergie aux bornes de la source équivalente batterie-SCs (approche décomposée). La REM et la structure de commande du système correspondant sont données Figure I-3. La structure de commande du système consiste à assurer l'objectif global des sources qui est de fournir la puissance appelée par le système de propulsion (contrôle du couple  $C_{po-ref}$ ). La stratégie de gestion d'énergie permet d'assurer l'objectif interne des sources (répartition des flux d'énergie). La répartition des flux d'énergie entre la source équivalente batterie-SCs et le système MCI passe par la gestion du couplage mécanique. Les variables de commandes potentielles correspondent aux différentes possibilités de gestion de l'élément de couplage. Il y a le couple de référence  $C_{bv-ref}$  de la boîte de vitesse, le couple de référence  $C_{me-ref}$  de la machine électrique ou encore un coefficient de répartition  $k_R$  du couple  $C_{po-ref}$  entre les couples  $C_{bv-ref}$  et  $C_{me-ref}$ . Le choix parmi les différentes possibilités mises en évidence, s'effectue sur des critères heuristiques. Le point essentiel est que la méthodologie utilisée dans les travaux relatifs à la thèse peut s'appliquer également à ce type de structure, qui fait intervenir également un couplage mécanique. A noter que les sources équivalente MCI (MCI-réservoir-embrayage) et système batterie-SCs peuvent être gérées par une stratégie à base d'optimisation ou à base de règles expertes.

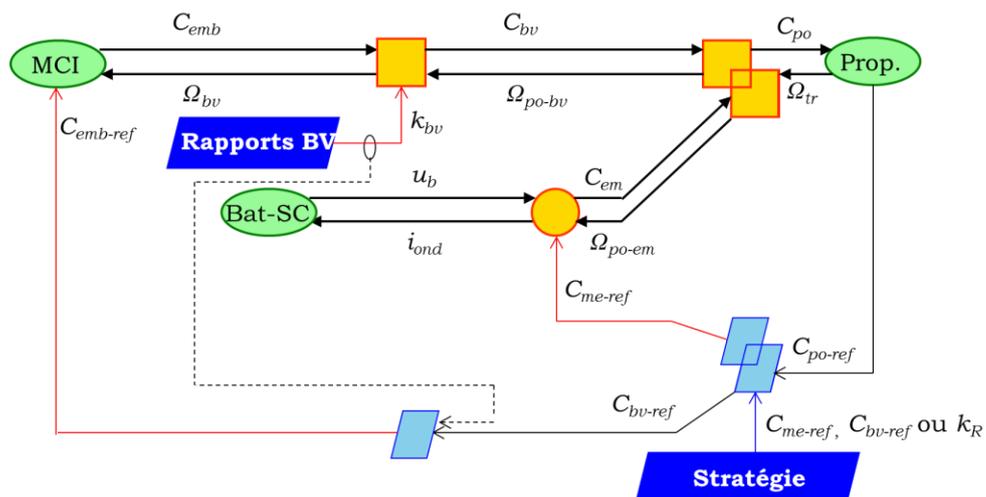


Figure I-3 : REM et structure de commande du système global (approche décomposée)

# Références bibliographiques

## A

- [Abdenmour 2001] R.B. Abdenmour *Identification et commande numérique des procédés industriels*. Editions TECHNIP, 2001.
- [Akinyele 2014] D.O. Akinyele, R.K. Rayudu “Review of energy storage technologies for sustainable power networks,” *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 8, pp. 74–91, Dec. 2014.
- [Akli 2008] C.R. Akli “Conception systémique d’une locomotive hybride autonome. Application à la locomotive hybride de démonstration et d’investigations en énergétique LHyDIE développée par la SNCF,” thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [Allègre 2010a] A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, J.-N. Verhille, P. Delarue, E. Chattot, S. El-Fassi “Reduced-Scale-Power Hardware-in-the-Loop Simulation of an Innovative Subway,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1175–1185, 2010.
- [Allègre 2010b] A.-L. Allègre “Méthodologie de modélisation et de gestion de l’énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides,” thèse de doctorat, Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2010.
- [Allègre 2013] A.-L. Allègre, A. Bouscayrol, R. Trigui “Flexible real-time control of a hybrid energy storage system for electric vehicles,” *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 3, no. 3, pp. 79–85, 2013.
- [Amjadi 2010] Z. Amjadi, S.S. Williamson “Power-Electronics-Based Solutions for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Energy Storage and Management Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 608–616, Feb. 2010.
- [Andreasen 2014] S.J. Andreasen, L. Ashworth, S. Sahlin, H.-C. Becker Jensen, S.K. Kær “Test of hybrid power system for electrical vehicles using a lithium-ion battery pack and a reformed methanol fuel cell range extender,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, no. 4, pp. 1856–1863, Jan. 2014.
- [Astier 2012] S. Astier, A. Bouscayrol, X. Roboam “Introduction à la systémique et à la démarche systémique,” *Conception systémique pour la conversion d’énergie électrique*, Hermès Science., Tome 1, 2012.

- [Azib 2010a] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, C. Marchand, E. Berthelot “An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Source,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4024–4031, Dec. 2010.
- [Azib 2010b] T. Azib “Contribution à l’Etude d’Electro-générateurs à Pile à Combustible,” thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, 2010.
- [Azib 2014] T. Azib, C. Larouci, A. Chaibet, M. Boukhnifer “Online energy management strategy of a hybrid fuel cell/battery/ultracapacitor vehicular power system,” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 548–554, Sep. 2014.

## B

- [Barrade 2003] P. Barrade, A. Rufer “Current Capability and Power Density of Supercapacitors: Considerations on Energy Efficiency,” presented at the EPE 2003, Toulouse, France, 2003.
- [Becerra 2011] V.M. Becerra “Optimal control,” in *The Industrial Electronics Handbook, Second Edition*, vol. Control and Mechatronics, 2011.
- [Belhachemi 2001] F. Belhachemi “Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à couche double électrique utilisés en électronique de puissance,” thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001.
- [Bellman 2003] R. Bellman *Dynamic Programming*, Reprint edition. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2003.
- [Berkel 2015] K. van Berkel, R. Titulaer, T. Hofman, B. Vroemen, M. Steinbuch “From Optimal to Real-Time Control of a Mechanical Hybrid Powertrain,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 670–678, Mar. 2015.
- [Bernard 2009] J. Bernard, S. Delprat, F.N. Buchi, T.-M. Guerra “Fuel-Cell Hybrid Powertrain: Toward Minimization of Hydrogen Consumption,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3168–3176, Sep. 2009.
- [Bernot 2002] F. Bernot “Hacheurs: filtres, commutations et commande,” *Techniques de l’Ingénieur*. août 2002.
- [Boscaino 2015] V. Boscaino, G. Capponi, R. Miceli, G. Ricco Galluzzo, R. Rizzo “Comparison of models of fuel cells based on experimental data for the design of power electronics

systems,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 6, pp. 660–668, 2015.

- [Boucherit 2011] A. Boucherit “Conception d’un convertisseur de puissance pour véhicules électriques multi-sources,” thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliart, 2011.
- [Boulon 2009] L. Boulon “Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d’énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d’énergie.,” thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2009.
- [Bourdin 2013] L. Bourdin “Contributions au calcul des variations et au Principe du Maximum de Pontryagin en calculs time scale et fractionnaire,” thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l’Adour, 2013.
- [Bouscayrol 2000] A. Bouscayrol, X. Guillaud, J.-P. Hautier, P. Delarue “Macro modélisation des conversions électromécaniques: application à la commande des machines électriques,” *Rev. Int. Génie Electrique*, vol. 3, no. 2, pp. 257–282, juin. 2000.
- [Bouscayrol 2003] A. Bouscayrol “Formalismes de Représentation et de Commande Appliqués aux Systèmes Electromécaniques Multimachines Multiconvertisseurs,” habilitation à diriger des recherches, Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2003.
- [Bouscayrol 2009] A. Bouscayrol, X. Guillaud, P. Delarue, B. Lemaire-Semail “Energetic Macroscopic Representation and Inversion-Based Control Illustrated on a Wind-Energy-Conversion System Using Hardware-in-the-Loop Simulation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 12, pp. 4826–4835, Dec. 2009.
- [Bouscayrol 2011] A. Bouscayrol “Hardware-in-the-loop simulation,” in *Control and mechatronics*, Wilamowski Bogdan M. and Irwin J. David., Chicago: CRC Press, Taylor & Francis group, 2011.

## C

- [Castaings 2014] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, A. Bouscayrol “Energy management in EVs using battery and supercapacitors: Algebraic loop issue,” presented at the EPE’14 ECCE Europe, Finlande, 2014.

- [Castaings 2015a] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, A. Bouscayrol “Practical control schemes of a battery/supercapacitor system for electric vehicle,” *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 6, no. 1, pp. 20–26, Nov. 2015.
- [Castaings 2015b] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, A. Bouscayrol, E. Redondo-Iglesias “Adaptive optimisation-based strategy of a battery/supercapacitor system for EV,” in *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Canada, 2015.
- [Castaings 2016] A. Castaings, W. Lhomme, R. Trigui, A. Bouscayrol “Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints,” *Appl. Energy*, vol. 163, pp. 190–200, Feb. 2016.
- [CEA 2012] CEA “Le stockage stationnaire de l’énergie - Technologies disponibles et recherches du CEA,” oct. 2012.
- [CGDD 2015a] CGDD “Chiffres clés de l’énergie - Edition 2014,” Commissariat général au développement durable, fév. 2015.
- [CGDD 2015b] CGDD “Les comptes des transports en 2014,” rapport à la commission des comptes des transports de la nation Tome 1, juil. 2015.
- [CGDD 2015c] CGDD “Immatriculations de véhicules routiers neufs en 2014 : faible rebond des véhicules légers,” 662, juil. 2015.
- [Chan 2001] S.H. Chan, K.A. Khor, Z.T. Xia “A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness,” *J. Power Sources*, vol. 93, no. 1–2, pp. 130–140, Feb. 2001.
- [Chan 2009] C.C. Chan, Y.S. Wong, A. Bouscayrol, K. Chen “Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles [Point of View],” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 4, pp. 603–607, Apr. 2009.
- [Chan 2010] C.C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen “Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 589–598, 2010.
- [Chatroux 2015] D. Chatroux “Transport électrique routier - Batteries pour véhicules électriques,” *Techniques de l’Ingénieur*. 10 mai 2015.
- [Chen 2010] K. Chen “Common Energetic Macroscopic Representation and unified control structure for differnet hybrid electric

vehicles,” thèse de doctorat, Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2010.

- [Chen 2014] B.-C. Chen, Y.-Y. Wu, H.-C. Tsai “Design and analysis of power management strategy for range extended electric vehicle using dynamic programming,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1764–1774, Jan. 2014.
- [Choi 2002] S.S. Choi, H.S. Lim “Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO<sub>2</sub>,” *J. Power Sources*, vol. 111, no. 1, pp. 130–136, Sep. 2002.
- [Choi 2014] M.-E. Choi, J.-S. Lee, S.-W. Seo “Real-Time Optimization for Power Management Systems of a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 3600–3611, Oct. 2014.
- [Chrenko 2008] D. Chrenko “Energetic Macroscopic Representation Modeling and Control of a Low Temperature Fuel Cell System Fed by Hydrocarbons,” thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2008.
- [Christen 2000] T. Christen, M.W. Carlen “Theory of Ragone plots,” *J. Power Sources*, vol. 91, no. 2, pp. 210–216, Dec. 2000.
- [Corbo 2011] P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri *Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [Cross 2008] D. Cross, J. Hilton “High Speed Flywheel Based Hybrid Systems for Low Carbon Vehicles,” in *Hybrid and Eco-Friendly Vehicle Conference, 2008. IET HEVC 2008*, 2008, pp. 1–5.
- [Culioli 1994] J.-C. Culioli *Introduction à l’Optimisation*. Ellipses, 1994.

## D

- [Delarue 2003] P. Delarue, A. Bouscayrol, E. Semail “Generic control method of multileg voltage-source-converters for fast practical implementation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 517–526, 2003.
- [Delprat 2002a] S. Delprat, T.M. Guerra, J. Rimaux “Optimal control of a parallel powertrain: from global optimization to real time control strategy,” in *Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002. IEEE 55th*, 2002, vol. 4, pp. 2082–2088 vols.4.

- [Delprat 2002b] S. Delprat “Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèles,” thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002.
- [Delprat 2004] S. Delprat, J. Lauber, T.-M. Guerra, J. Rimaux “Control of a parallel hybrid powertrain: optimal control,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 872–881, May 2004.
- [Depature 2014] C. Depature, W. Lhomme, A. Bouscayrol, P. Sicard, L. Boulon “Efficiency Map of the Traction System of an Electric Vehicle from an On-Road Test Drive,” in *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2014, pp. 1–6.
- [Devie 2012] A. Devie “Caractérisation de l’usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l’étude du vieillissement et de la fiabilité,” thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.

## **E**

- [Ehsani 2005] M. Ehsani, Y. Gao, S. E.Gray, A. Emadi *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 2e édition vols. New York: CRC Press, 2005.

## **F**

- [Florescu 2015] A. Florescu, S. Bacha, I. Munteanu, A.I. Bratcu, A. Rumeau “Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 280, pp. 410–421, Apr. 2015.
- [Francois 2003] B. Francois “Conception des dispositifs de commande des convertisseurs de puissance par modulation directe des conversions Perspectives pour l’insertion de production d’énergie dispersée dans les réseaux électriques,” Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2003.

## **G**

- [Ganesan 2006] V. Ganesan *Internal Combustion Engines*, Second Edition. McGraw Hill Education (India) Pvt Ltd, 2006.
- [Gao 2008] D. Gao, Z. Jin, Q. Lu “Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus,” *J. Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 311–317, Oct. 2008.

- [García 2012] P. García, J.P. Torreglosa, L.M. Fernández, F. Jurado “Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, no. 11, pp. 9368–9382, Jun. 2012.
- [Gauchia Babé 2009] L. Gauchia Babé “Nonlinear dynamic per-unit models for electrochemical energy systems. Application to a hardware-in-the-loop hybrid simulation,” Universidad Carlos III de Madrid, Leganès, 2009.
- [Gauchia Babé 2011] L. Gauchia Babé, A. Bouscayrol, J. Sanz, R. Trigui, P. Barrade “Fuel cell, battery and supercapacitor hybrid system for electric vehicle: Modeling and control via energetic macroscopic representation,” in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2011, pp. 1–6.
- [Ghoniem 2011] A.F. Ghoniem “Needs, resources and climate change: Clean and efficient conversion technologies,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 15–51, Feb. 2011.
- [Gong 2008] Q. Gong, Y. Li, Z.-R. Peng “Trip-Based Optimal Power Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp. 3393–3401, Nov. 2008.
- [Gualous 2007] H. Gualous, R. Gallay “Application des supercondensateurs,” *Tech. L’Ingénieur*, no. d3335, août. 2007.
- [Guzzella 2013a] L. Guzzella, A. Sciarretta “Supervisory Control Algorithms,” in *Vehicle Propulsion Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 243–276.
- [Guzzella 2013b] L. Guzzella, A. Sciarretta *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization*, Third Edition. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

## H

- [Han 2014] J. Han, Y. Park, D. Kum “Optimal adaptation of equivalent factor of equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicles under active state inequality constraints,” *J. Power Sources*, vol. 267, pp. 491–502, Dec. 2014.
- [Hautier 1999] J.-P. Hautier, J.-P. Caron *Convertisseurs statiques: méthodologie causale de modélisation et de commande*. Editions TECHNIP, 1999.

- [He 2013] H. He, R. Xiong, K. Zhao, Z. Liu “Energy management strategy research on a hybrid power system by hardware-in-loop experiments,” *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 1311–1317, Dec. 2013.
- [Hellwig 2011] C. Hellwig, S. Sörgel, W.G. Bessler “A Multi-Scale Electrochemical and Thermal Model of a LiFePO<sub>4</sub> Battery,” *ECS Trans.*, vol. 35, no. 32, pp. 215–228, Nov. 2011.
- [Horrein 2011] L. Horrein, V. Derache, A. Bouscayrol, J.-N. Verhille, P. Delarue “Different models of the traction system of an automatic subway,” presented at the ELECTRIMACS 2011, Cergy-Pontoise, France, 2011.
- [Horrein 2015a] L. Horrein, A. Bouscayrol, Y. Cheng, M. El Fassi “Dynamical and quasi-static multi-physical models of a diesel internal combustion engine using Energetic Macroscopic Representation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 280–291, Feb. 2015.
- [Horrein 2015b] L. Horrein “Gestion d’énergie d’un véhicule hybride intégrant les aspects thermiques via la Représentation Energétique Macroscopique,” thèse de doctorat, Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2015.
- [Hredzak 2014] B. Hredzak, V.G. Agelidis, M. Jang “A Model Predictive Control System for a Hybrid Battery-Ultracapacitor Power Source,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1469–1479, Mar. 2014.
- [Hung 2012] Y.-H. Hung, C.-H. Wu “An integrated optimization approach for a hybrid energy system in electric vehicles,” *Appl. Energy*, vol. 98, pp. 479–490, Oct. 2012.

## I

- [IEA 2013] IEA “A Tale of Renewed Cities,” 2013.
- [Imai 2008] K. Imai, T. Ashida, Y. Zhang, S. Minami “EV range extender: Better mileage than plug-in hybrid?,” in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08*, 2008, pp. 1–3.

## J

- [Jaafar 2009] A. Jaafar, C.R. Akli, B. Sareni, X. Roboam, A. Jeunesse “Sizing and Energy Management of a Hybrid Locomotive

Based on Flywheel and Accumulators,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3947–3958, 2009.

- [Jaafar 2011] A. Jaafar “Traitement de la mission et des variables environnementales et intégration au processus de conception systémique,” thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, 2011.
- [Jensen 2013] H.B. Jensen, E. Schaltz, P.S. Koustrup, S.J. Andreasen, S.K. Kaer “Evaluation of Fuel-Cell Range Extender Impact on Hybrid Electrical Vehicle Performance,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 1, pp. 50–60, 2013.
- [Johnson 2002] V.H. Johnson “Battery performance models in ADVISOR,” *J. Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 321–329, Aug. 2002.

## **K**

- [Kawamura 2008] A. Kawamura, M. Pavlovsky, Y. Tsuruta “State-of-the-art high power density and high efficiency DC-DC chopper circuits for HEV and FCEV applications,” in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 7–20.
- [Kermani 2009] S. Kermani “Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel,” thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2009.
- [Kessels 2007] J.T.B.A. Kessels “Energy Management for Automotive Power Nets,” thèse de doctorat, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2007.
- [Kessels 2008] J.T.B.A. Kessels, M.W.T. Koot, P.P.J. van den Bosch, D.B. Kok “Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp. 3428–3440, Nov. 2008.
- [Khaligh 2010] A. Khaligh, Z. Li “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010.
- [Kim 2007] M.-J. Kim, H. Peng “Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 819–832, Mar. 2007.
- [Kirk 2004] D.E. Kirk *Optimal Control Theory: An Introduction*. Dover Publications, 2004.

- [Kirkpatrick 1984] S. Kirkpatrick “Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studie,” *J. Stat. Phys.*, vol. 34, no. 5/6, 1984.
- [Ko 2015] Y. Ko, J. Lee, H. Lee “A Supervisory Control Algorithm for a Series Hybrid Vehicle With Multiple Energy Sources,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 11, pp. 4942–4953, Nov. 2015.
- [Koot 2005] M. Koot, J.T.B.A. Kessels, B. de Jager, W.P.M.H. Heemels, P.P.J. van den Bosch, M. Steinbuch “Energy management strategies for vehicular electric power systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 54, no. 3, pp. 771–782, May 2005.
- [Kuhn 2006] E. Kuhn, C. Forgez, P. Lagonotte, G. Friedrich “Modelling Ni-mH battery using Cauer and Foster structures,” *J. Power Sources*, vol. 158, no. 2, pp. 1490–1497, Aug. 2006.
- [Kurzweil 2005] P. Kurzweil, B. Frenzel, R. Gally “Capacitance Characterization Methods and Ageing Behaviour of Supercapacitors,” presented at the The 15th International Seminar On Double Layer Capacitors, Deerfield Beach, FL., U.S.A, 2005.

## L

- [Lahyani 2013] A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi, A. Troudi “Battery/Supercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply (UPS),” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1509–1522, Apr. 2013.
- [Lario-García 2006] J. Lario-García, R. Pallàs-Areny “Constant-phase element identification in conductivity sensors using a single square wave,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 132, no. 1, pp. 122–128, Nov. 2006.
- [Lefebvre-Joud, 2011] F. Lefebvre-Joud, “Fuel cells technology: which may be the winners?,” presented at the Energy: socio-economical stakes and technological challenges, Collège de France, Jun-2011.
- [Letrouvé 2010] T. Letrouvé, A. Bouscayrol, W. Lhomme, N. Dollinger, F.M. Calvairac “Different models of a traction drive for an electric vehicle simulation,” in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010, pp. 1–6.
- [Letrouvé 2013] T. Letrouvé “Structuration de la commande de la simulation au prototype d’un véhicule hybride double

parallèle au travers de la Représentation Énergétique Macroscopique,” thèse de doctorat, Université Lille 1, Sciences et Technologies, Lille, 2013.

- [Lhomme 2005] W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol, A. Rufer “Design and Control of a supercapacitor storage system for traction applications,” in *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*, 2005, vol. 3, p. 2013–2020 Vol. 3.
- [Lhomme 2007] W. Lhomme “Gestion d’énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique,” thèse de doctorat, Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2007.
- [Lhomme 2014] W. Lhomme, P. Delarue, A. Bouscayrol, P. Barrade “La REM, formalisme multiphysique de commande de systèmes énergétiques,” *Techniques de l’Ingénieur*. 10 nov. 2014.
- [Li 2012] Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, J. Huang “Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 514–525, Dec. 2012.
- [Lin 2011] W.-S. Lin, C.-H. Zheng “Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3280–3289, Mar. 2011.
- [Liu 2010] P. Liu, J. Wang, J. Hicks-Garner, E. Sherman, S. Soukiazian, M. Verbrugge, H. Tataria, J. Musser, P. Finamore “Aging Mechanisms of LiFePO<sub>4</sub> Batteries Deduced by Electrochemical and Structural Analyses,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, no. 4, pp. A499–A507, Jan. 2010.
- [Louvrier 2010] Y. Louvrier “Etude et optimisation d’un convertisseur DC/DC à canaux multiples entrelacés,” thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2010.

## M

- [Markel 2002] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik, K. Wipke “ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling,” *J. Power Sources*, vol. 110, pp. 255–266, 2002.

- [Maxima ] Maxima “Maxima, a Computer Algebra System.” [Online]. Available at: <http://maxima.sourceforge.net/>. [Accessed: 06-Jul-2015].
- [Mayet 2014a] C. Mayet, J. Pouget, A. Bouscayrol, W. Lhomme “Influence of an Energy Storage System on the Energy Consumption of a Diesel-Electric Locomotive,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 3, pp. 1032–1040, Mar. 2014.
- [Mayet 2014b] C. Mayet, L. Horrein, A. Bouscayrol, P. Delarue, J.-N. Verhille, E. Chattot, B. Lemaire-Semail “Comparison of Different Models and Simulation Approaches for the Energetic Study of a Subway,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 2, pp. 556–565, Feb. 2014.
- [Mayet 2014c] C. Mayet, P. Delarue, A. Bouscayrol, E. Chattot, J.-N. Verhille “Dynamic Model and Causal Description of a Traction Power Substation Based on 6-Pulse Diode Rectifier,” presented at the 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, Portugal, 2014.
- [MEGEVH 2016] MEGEVH “MEGEVH - French network on HEVs,” 2016. [En ligne]
- [Montaru 2009] M. Montaru “Contribution à l’ évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages,” thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [Montaru 2010] M. Montaru, S. Pelissier “Frequency and Temporal Identification of a Li-ion Polymer Battery Model Using Fractional Impedance,” *Oil Gas Sci. Technol. – Rev IFP*, vol. 65, pp. 67–78, 2010.
- [Multon 2013] B. Multon, J. Aubry, P. Haessig, H. Ben Ahmed “Systèmes de stockage d’énergie électrique,” *Techniques de l’Ingénieur*, vol. BE8100. 10 avr. 2013.

## N

- [Naiff da Fonseca 2013] R. Naiff da Fonseca “Optimization of the Sizing and Energy Management Strategy for a Hybrid Fuel Cell Vehicle Including Fuel Cell Dynamics and Durability Constraints,” thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon-INSA Lyon, 2013.
- [Nguyen 2014] A. Nguyen, J. Lauber, M. Dambrine “Optimal control based algorithms for energy management of automotive power systems with battery/supercapacitor storage

devices,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 410–420, Nov. 2014.

## O

- [Olaru 2005] S. Olaru “Contribution à l’étude de la commande prédictive sous contraintes par approche géométrique,” thèse de doctorat, Paris XI Orsay, 2005.
- [Omar 2014] N. Omar, M.A. Monem, Y. Firouz, J. Salminen, J. Smekens, O. Hegazy, H. Gaulous, G. Mulder, P. Van den Bossche, T. Coosemans, J. Van Mierlo “Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1575–1585, Jan. 2014.
- [Ortuzar 2007] M. Ortuzar, J. Moreno, J. Dixon “Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 2147–2156, 2007.
- [Ostadi 2015] A. Ostadi, M. Kazerani “A Comparative Analysis of Optimal Sizing of Battery-Only, Ultracapacitor-Only, and Battery #x2013;Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems for a City Bus,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 10, pp. 4449–4460, Oct. 2015.

## P

- [Paganelli 2001] G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec, G. Rizzoni “General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles,” *JSAE Rev.*, vol. 22, no. 4, pp. 511–518, Oct. 2001.
- [Payman 2008] A. Payman, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar “Energy control of supercapacitor/fuel cell hybrid power source,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 6, pp. 1637–1644, Jun. 2008.
- [Pei 2008] P. Pei, Q. Chang, T. Tang “A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, no. 14, pp. 3829–3836, Jul. 2008.
- [Peterson 2010] S.B. Peterson, J. Apt, J.F. Whitacre “Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and

vehicle-to-grid utilization,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2385–2392, Apr. 2010.

- [Phattanasak 2015] M. Phattanasak, R. Gavagsaz-Ghoachani, J.P. Martin, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, B. Davat “Control of a Hybrid Energy Source Comprising a Fuel Cell and Two Storage Devices Using Isolated Three-Port Bidirectional DC #x2013;DC Converters,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 491–497, Jan. 2015.
- [Pontriaguine 1974] L. Pontriaguine, V. Boltianski, R. Gamkrélidzé, E. Michtchenko *Théorie mathématique des processus optimaux*, Editions de Moscou. 1974.
- [Poursamad 2008] A. Poursamad, M. Montazeri “Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles,” *Control Eng. Pract.*, vol. 16, no. 7, pp. 861–873, Jul. 2008.
- [PSA 2013] PSA “Hybrid Air, une solution innovante full hybrid essence,” *PSA PEUGEOT CITROËN*, 2013. [Online]. Available at: <http://www.psa-peugeot-citroen.com/fr/content/hybrid-air-6>. [Accessed: 22-Feb-2013].

## R

- [Rizoug 2006] N. Rizoug “Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: application au cyclage d’un module de supercondensateur basse tension en grande puissance,” thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, Lille, 2006.
- [Robert 2004] J. Robert, J. Alzieu “Accumulateurs au Plomb,” *Techniques de l’Ingénieur*, vol. d3352. nov. 2004.
- [Robert 2005a] J. Robert, J. Alzieu “Accumulateurs - Accumulateurs à oxyde de nickel,” *Techniques de l’Ingénieur*, vol. d3353. fév. 2005.
- [Robert 2005b] J. Robert, J. Alzieu “Accumulateurs au lithium,” *Techniques de l’Ingénieur*. août 2005.
- [Robin 2013] C. Robin, M. Gerard, A.A. Franco, P. Schott “Multi-scale coupling between two dynamical models for PEMFC aging prediction,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, no. 11, pp. 4675–4688, Apr. 2013.
- [Roboam 2012] X. Roboam *Conception systémique pour la conversion d’énergie électrique*, Tome 2. Lavoisier, 2012.

## S

- [Sadoun 2013] R. Sadoun “Intérêt d’une Source d’Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage,” thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2013.
- [Salmasi 2007] F.R. Salmasi “Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 5, pp. 2393–2404, 2007.
- [Santucci 2014] A. Santucci, A. Sorniotti, C. Lekakou “Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications,” *J. Power Sources*, vol. 258, pp. 395–407, Jul. 2014.
- [Savoie 2012] F. Savoie, P. Venet, M. Millet, J. Groot “Impact of Periodic Current Pulses on Li-Ion Battery Performance,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 9, pp. 3481–3488, Sep. 2012.
- [Sciarretta 2007] A. Sciarretta, L. Guzzella “Control of hybrid electric vehicles,” *IEEE Control Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 60–70, Apr. 2007.
- [Scordia 2004] J. Scordia “Approche systématique de l’optimisation du dimensionnement et de l’élaboration de lois de gestion d’énergie de véhicules hybrides,” thèse de doctorat, Universidad Henri Poincaré - Nancy 1, Nancy, 2004.
- [Scordia 2005] J. Scordia, R. Trigui, F. Badin, M. Desbois-Renaudin, B. Jeanneret, C. Plasse “Global optimisation of energy management laws in hybrid vehicles using dynamic programming,” *Int J Veh. Des.*, vol. 39, no. 4, pp. 349–367, 2005.
- [Simon 2011] P. Simon “Supercondensateurs : principes et évolution,” presented at the Chaire de Développement durable-Environnement, énergie et société, Collège de France, Paris, 02-Feb-2011.
- [Solano-Martinez 2011] J. Solano-Martinez, D. Hissel, M.-C. Pera, M. Amiet “Practical Control Structure and Energy Management of a Testbed Hybrid Electric Vehicle,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4139–4152, Nov. 2011.
- [Song 2014] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, J. Hou, X. Han, M. Ouyang “Energy management strategies comparison for electric

vehicles with hybrid energy storage system,” *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 321–331, Dec. 2014.

- [Song 2015a] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, X. Han, X. Zhang, M. Ouyang “A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 274, pp. 400–411, Jan. 2015.
- [Song 2015b] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, X. Han, M. Ouyang “Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach,” *Appl. Energy*, vol. 139, pp. 151–162, Feb. 2015.
- [Stevens 2000] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir “Piles à combustible,” *Techniques de l’Ingénieur*, vol. d3340. août 2000.
- [Syed 2012] S.A. Syed “Energetic Macroscopic Representation and Multi-Level Energy Management for Heavy-Duty Hybrid Vehicles Using Double Planetary Geartrain,” thèse de doctorat, Université Lille 1, Sciences et Technologies, 2012.

## T

- [Tan 2013] X. Tan, Q. Li, H. Wang “Advances and trends of energy storage technology in Microgrid,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 179–191, Jan. 2013.
- [Tani 2012] A. Tani, M.B. Camara, B. Dakyo “Energy Management Based on Frequency Approach for Hybrid Electric Vehicle Applications: Fuel-Cell/Lithium-Battery and Ultracapacitors,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 8, pp. 3375–3386, Oct. 2012.
- [Taylor 2008] A.M.K.. Taylor “Science review of internal combustion engines,” *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4657–4667, 2008.
- [Thounthong 2009a] P. Thounthong, B. Davat, S. Rael, P. Sethakul “Fuel starvation,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 52–59, Jul. 2009.
- [Thounthong 2009b] P. Thounthong, S. Raël, B. Davat “Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications,” *J. Power Sources*, vol. 193, no. 1, pp. 376–385, Aug. 2009.
- [Thounthong 2010] P. Thounthong, S. Pierfederici, J.-P. Martin, M. Hinaje, B. Davat “Modeling and Control of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Source Based on Differential

- Flatness Control,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2700–2710, Jul. 2010.
- [Torokhti 1985] A. Torokhti, P. Howlett *Theory of Multiobjective Optimization*. Elsevier, 1985.
- [Trigui 2011] R. Trigui “Approche systémique pour la modélisation, la gestion de l’énergie et l’aide au dimensionnement des véhicules hybrides thermiques - électriques,” habilitation à diriger des recherches, Université Lille 1, Sciences et Technologies, Lille, 2011.
- [Trovão 2013] J.P. Trovão, P.G. Pereirinha, H.M. Jorge, C. Henggeler Antunes “A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles - An integrated rule-based meta-heuristic approach,” *Appl. Energy*, vol. 105, pp. 304–318, May 2013.
- [Trovão 2015a] J.P.F. Trovão, P.J.G. Pereirinha “Control scheme for hybridised electric vehicles with an online power follower management strategy,” *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 5, no. 1, pp. 12–23, 2015.
- [Trovão 2015b] J.P. Trovão, C.H. Antunes “A comparative analysis of meta-heuristic methods for power management of a dual energy storage system for electric vehicles,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 95, pp. 281–296, May 2015.
- [Trovão 2015c] J.P.F. Trovão, V.D.N. Santos, C. Henggeler Antunes, P.G. Pereirinha, H.M. Jorge “A Real-Time Energy Management Architecture for Multisource Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3223–3233, May 2015.
- [Turpin 2012] C. Turpin, S. Astier, X. Roboam “Introduction à la systémique et à la démarche systémique de conception,” *Conception systémique pour la conversion d’énergie électrique*, Hermès Science., Tome 1, 2012.
- [Tutuianu 2014] M. Tutuianu, A. Marotta, H. Steven, E. Ericsson, T. Haniu, N. Ichikawa, H. Ishii “Development of a Worldwide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC),” UN /ECE/WP.29/GRPE/WLTP - IG, GRPE-6 8-03, Jan. 2014.
- V**
- [Verhille 2007] J.-N. Verhille “Représentation énergétique macroscopique du métro VAL 206 et structures de commande déduites par inversion,” thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech CER de Lille, 2007.

[Vinot 2010] E. Vinot, R. Trigui, B. Jeanneret “Optimal management of electric vehicles with a hybrid storage system,” in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010, pp. 1–6.

[Vinot 2013] E. Vinot, R. Trigui “Optimal energy management of HEVs with hybrid storage system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 437–452, Dec. 2013.

## W

[Wirasingha 2011] S.G. Wirasingha, A. Emadi “Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 111–122, 2011.

## X

[Xueqin 2009] L. Xueqin, H. Fuzhen, L. Gang, Q. Rongfu “The challenges of technologies for fuel cell and its application on vehicles,” in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International*, 2009, pp. 2328–2333.

## Y

[Yu 2011] Z. Yu, D. Zinger, A. Bose “An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351–2359, Feb. 2011.

[Yuan 2013] Z. Yuan, L. Teng, S. Fengchun, H. Peng “Comparative Study of Dynamic Programming and Pontryagin’s Minimum Principle on Energy Management for a Parallel Hybrid Electric Vehicle,” *Energies*, vol. 6, no. 4, pp. 2305–2318, Apr. 2013.

## Z

[Zandi 2011] M. Zandi, A. Payman, J.-P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, F. Meibody-Tabar “Energy Management of a Fuel Cell/Supercapacitor/Battery Power Source for Electric Vehicular Applications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 433–443, Feb. 2011.

[Zhang 2015] S. Zhang, R. Xiong “Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming,” *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 68–78, Oct. 2015.

[Zubieta 2000] L. Zubieta, R. Bonert “Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205, Jan. 2000.