



École Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Lille1, Sciences et Technologies

Spécialité : Génie Électrique

Présentée et soutenue publiquement par

ALLEGRE Anne-Laure

le 6 Septembre 2010

**Méthodologies de modélisation et de gestion de
l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour
véhicules électriques et hybrides**

Membres du jury :

M. Stephan ASTIER	INP Toulouse	Rapporteur
M. Alain BOUSCAYROL	Université Lille1	Directeur de thèse
M. Gérard COQUERY	INRETS Satory	Président
M. Philippe DELARUE	Université Lille1	Examineur
M. Daniel HISSEL	Université de Franche Comté	Examineur
M. Alfred RUFER	EPF Lausanne	Rapporteur
M. Rochdi TRIGUI	INRETS Bron	Co-encadrant
M. Jean-Noël VERHILLE	Siemens	Examineur

Remerciements

Le travail de thèse c'est un peu comme celui d'une association de supercondensateurs et de batteries. Il y a des moments où le travail demandé est agréable, où les simulations et les expérimentations fonctionnent. A ce moment là, le thésard fonctionne sur ses batteries de travail et fournit une importante quantité de travail mais de façon régulière. Et puis il y a les moments où les pics de travail et le stress sont très intenses, c'est le cas notamment avant les conférences, avant de rendre un article, avant les périodes d'enseignement, quand on arrive en troisième année, quand rien ne marche et qu'il y a peu de temps... A ce moment là, le thésard sollicite ses supercondensateurs de travail, caractérisés par leur capacité à fournir une puissance de travail importante en très peu de temps. Le problème c'est que ces supercondensateurs ont tendance à se décharger très rapidement, et ne peuvent plus fonctionner au delà d'un certain taux de décharge. Ainsi, le rôle des encadrants consiste à aider à recharger régulièrement ces supercondensateurs de travail afin d'assurer aux batteries de travail du thésard une durée de vie d'au moins trois ans !

A ce propos, je tiens à remercier chaleureusement le professeur Alain Bouscayrol de l'Université Lille1, et le chargé de recherche Rochdi Trigui du LTE-INRETS de Bron, sans lesquels je ne suis pas sûre que mes batteries de travail auraient survécues ! Un grand merci Alain pour ta confiance sur ces trois ans, ton soutien, tes encouragements, ton optimisme à toutes épreuves, ta motivation. Merci également pour les nombreuses discussions scientifiques et non scientifiques que l'on a pu avoir ensemble, ta rigueur et ta patience, ce fut un plaisir de travailler avec toi. Un grand merci Rochdi pour ton accueil à Bron, les travaux brefs mais intenses qu'on a pu mener ensemble, je pense notamment à nos promenades en Microbus au sein de l'INRETS. Merci également pour ta bonne humeur, ta rigueur scientifique, ton côté très applicatif et les fous rires qu'on a pu avoir ensemble sur mes mots anglais « very ill-choosen » !

Je tiens également à remercier le maître de conférence Philippe Delarue, de l'Université Lille1 qui m'a sauvée plus d'une fois quand je pataugeais dans mes expérimentations et sans qui le chapitre 2 de ce mémoire aurait eu du mal à exister. Merci encore Philippe pour ta grande patience et tes explications simples et limpides.

Je teins bien-sûr à remercier les membres du jury pour leur participation. Je tiens à remercier tout d'abord M. le directeur de recherche Gérard Coquery de l'INRETS de Satory pour avoir présidé ce jury et MM. les professeurs Alfred Rufer de l'EPF Lausanne et Stephan Astier de l'INP de Toulouse, pour leur travail en tant que rapporteur de mon mémoire un peu long, et leur jugement toujours constructif. Je teins à remercier aussi le professeur Daniel Hissel de l'Université de Franche Comté et M. Jean-Noël Verhille de Siemens Transportation Systems, pour leur participation au jury, mais aussi pour les diverses discussions scientifiques que l'on a eues lors de nos diverses rencontres.

Je tiens également à remercier le docteur Maxime Montaru et le chargé de recherche Serge Pélissier, de l'INRETS de Bron, pour leur grande aide dans la modélisation des batteries. Merci Maxime pour le temps que tu m'as consacré alors que tu étais en pleine rédaction, pour ta rigueur et ton calme à toute épreuve. Merci Serge pour ta très grande pédagogie, pour ta toujours bonne humeur et ton humour débordant. Je tiens également à remercier Stéphane Ardizzone pour avoir été un chauffeur exemplaire pour les essais sur le microbus et pour le temps qu'il y a consacré. Merci également à Emmanuel Vinot, Bertrand Balaquin, Bruno Jeanneret, Baldrik Faure du LTE de Bron et Bogdan Vulturescu du LTN de Satory.

Je tiens également à remercier le technicien Olivier Ferla de l'Université Lille1 pour sa grande aide pour la construction du banc de batteries. Merci Olivier pour ta grande disponibilité, le temps que tu m'as consacré et tes supers soudures résistantes à toutes épreuves.

Je tiens à remercier également Jean-Noël Verhille, ingénieur chez STS, pour son aide, sa gentillesse et ses informations, notamment sur le métro. Je remercie aussi l'ensemble de l'équipe de STS Transport pour m'avoir autorisée à utiliser le métro Néoval comme exemple d'application de ma thèse.

Merci au docteur Philippe Barrade, premier assistant au LEI de Lausanne, pour les conseils, l'intérêt et les idées qu'il a pu m'apporter aux cours de ses brèves escales à Lille.

Je remercie également, le maître de conférence Walter Lhomme et la doctorante Keyu Chen pour leur aide, notamment en expérimentation.

Un grand merci également à Claire Cardon pour sa bonne humeur, son efficacité redoutable et son grande aide pour la paperasse.

Au cours de ces trois années, j'ai également goûté au plaisir d'enseigner et tiens à remercier notamment le maître de conférence Frédéric Girard, le professeur Mounaim Tounzi, le professeur Alain Bouscayrol et l'enseignant Thierry Communal de l'Université Lille1 pour m'avoir épaulé pour mes premiers TPs. Une attention particulière pour l'enseignant Jean François Sergent de l'Université Lille1 pour sa patience et sa disponibilité face à mes nombreuses questions. Un très grand merci également à l'enseignant David Broutin qui m'a beaucoup aidé pour refaire le sujet de TP de l'installation solaire de l'IUT.

Je tiens à remercier toute la joyeuse troupe internationale de doctorants avec laquelle j'ai partagé trois ans de repas de RU et bien plus encore, dans la joie et la bonne humeur. Merci à Mircea, Bruno, Quang, Rindra, Zuqi, Fédérica, Marc-André... Un grand merci Juliana pour ton amitié, ton soutien féminin, et toutes les discussions que l'on a pu avoir au quotidien. Une attention bien particulière à Francisc, mon ami de bureau pour sa bonne humeur, ses histoires et son humour toujours au rendez-vous, ainsi que pour les longues discussions philosophiques que l'on a pu avoir ensemble. Ce n'est pas le bureau 109 qui me manquera, mais bien le double effet Francisc ! Merci à Maxime et nos passes de salsa dans le bureau 109 ! Un grand merci à Loïc pour cette journée magique dans le parc national près de Québec et à Tony pour nos péripéties américaines et canadiennes. Un grand merci à Marion pour ton aide « carbon care », ton amitié, ta bonne humeur et ta motivation à toutes épreuves.

Merci à toute l'équipe du L2EP de Lille et du LTE de Bron.

Je tiens également à remercier mes parents pour leur soutien tout au long de ses trois ans. C'est en partie grâce à vous que j'en suis arrivée là. Merci d'avoir cru en moi.

Merci à mes amies Carine, Nadia, Nadège, Cécile pour m'avoir soutenue et encouragée au quotidien. Un grand merci à mon petit ami Nicolas pour son soutien à toutes épreuves, ses remontages de moral, sa patience tout au long de ces trois années.

Enfin un grand merci aux Shadoks et leurs devises, affichées sur le mur au dessus de mon bureau.

Résumé

Les véhicules thermiques conventionnels se trouvent dans une situation critique due à leur forte dépendance vis-à-vis du pétrole, leur contribution à l'accroissement de l'effet de serre et à l'augmentation de la pollution atmosphérique. Le transport du futur devra donc à la fois concilier diversification énergétique, maîtrise des émissions de CO₂ et maîtrise des émissions polluantes.

Les solutions Véhicules Electriques (VEs) et Véhicules Electriques Hybrides (VEHs) nécessitent de stocker à bord du véhicule de l'énergie électrique. Pour les véhicules existants sur le marché automobile, le stockage se fait principalement par batteries et pose un certain nombre de problèmes : autonomie, durée de vie, poids... Un moyen pour répondre à ces problématiques consiste à associer deux Systèmes de Stockages d'Energie (SSE) électriques, choisis de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. L'objectif de la thèse vise à proposer une méthodologie d'étude des associations de SSE électriques pour VEs et VEHs, de façon à en déduire des règles de modélisation, de commande et de dimensionnement.

Une architecture et une Représentation Energétique Macroscopique (REM) générales, capable de décrire l'ensemble des VEs mixtes utilisant deux SSE électriques, sont établies. La REM générale permet de mieux analyser le système et de simuler l'ensemble des architectures avec un seul et même programme. L'architecture générale permet de tester différentes architectures sur un même banc expérimental. Cette REM est étendue à des VEHs utilisant deux SSE électriques et à des VEs mixtes utilisant trois SSE électriques. La méthodologie de modélisation est appliquée, en particulier, à deux VEs mixtes ayant des architectures différentes, une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte, puis étendue à un VEH mixte de type série et un métro électrique mixte utilisant trois SSE électriques. Les SSE électriques utilisés sont constitués de batteries et de supercondensateurs.

Les structures de commande de chaque véhicule présenté sont élaborées. Elles ont été validées par simulation et par expérimentation en utilisant des stratégies simples de gestion d'énergie. En particulier, la structure de commande de la voiture électrique mixte a été validée expérimentalement en utilisant une simulation « Hardware-in-the-Loop » (HIL) à échelle réduite, et celle du microbus électrique sur un véhicule réel. Différentes stratégies de gestion de l'énergie ont été développées pour la voiture électrique mixte batteries / supercondensateurs. Une étude montre l'influence de ces stratégies notamment sur la consommation de l'énergie électrique de la batterie, sa durée de vie et son dimensionnement.

Mots clefs : Système de Stockage d'Energie électrique mixte, association batteries / supercondensateurs, Véhicules Electriques mixtes, Véhicules Electriques Hybrides mixtes, méthodologie de modélisation, commande automatique, gestion de l'énergie.

Abstract

Conventional vehicles are in a critical situation because of their dependence towards oil, their participation towards increase of the greenhouse effect and of atmospheric pollution. In this context, future transportation systems has to conciliate energetic diversification, control of greenhouse and pollutant emissions.

The solutions Electric Vehicles (EVs) and Hybrid Electric Vehicle (HEVs) need on-board electric energy storage. For the existing vehicles, batteries are generally used, and yield some problems as: autonomy, lifetime, weight... The association of two electric Energy Storage Systems (ESSs), with complementary characteristics, could be a valuable sub-system in order to improve the on-board energy storage. The objective of this thesis aims to propose a methodology of study of electric ESSs associations for EVs and HEVs in order to deduce model, control and sizing rules.

General topology and Energetic Macroscopic Representation (EMR), which can describe all mixed EVs using two electric ESSs, are established. The general EMR allows a better analyse of the system and allows simulating all topologies with a unique simulation program. The general topology allows testing different topologies on a same experimental set-up. The EMR is extended to mixed HEVs using two electric ESSs, and to mixed EVs using three electric ESSs. The modelling methodology is in particular applied to two mixed EVs with different topologies, a mixed electric car and a mixed electric microbus. Then, it is extended to a mixed series HEV and a mixed electric subway using three electric ESSs. The used electric ESSs are constituted of batteries and supercapacitors.

The control structures of each vehicle are deduced from their EMRs. They have been validated in simulation and in experimentation using simple energy management strategies. In particular, the control structure of the mixed electric car has been validated experimentally using a reduced scale Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation and the control structure of the mixed electric microbus has been validated on a real vehicle. Different energy management strategies have been developed for the mixed electric car using batteries / supercapacitors. A study shows the influence of these strategies on the electric consumption of the batteries, their lifetime and their sizing. Some strategies have been validated experimentally on the real mixed electric microbus.

Keywords: mixed electric Energy Storage System, Association batteries / supercapacitors, mixed Electric Vehicles, mixed Hybrid electric Vehicles, modelling methodology, automatic control, energy management.

Table de matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>1. Stockage Mixte de l'Energie Electrique pour VEs et VEHS</i>	5
1.1. Intérêt de la production mixte de l'énergie électrique	7
1.1.1. Définitions	7
1.1.2. Cahier des charges d'un véhicule idéal du futur	8
1.1.3. Solutions actuelles et leurs limites	10
1.1.4. Stockage mixte de l'énergie électrique en perspective	17
1.2. Association de sources électriques	21
1.2.1. Architecture d'association de sources électriques.....	21
1.2.2. Modélisation des sources de stockage d'énergie électrique	24
1.3. Conclusions	36
<i>2. Méthodologie de Modélisation de VEs et de VEHS mixtes</i>	37
2.1. VEs mixtes à 3 sources électriques	39
2.1.1. Approche	39
2.1.2. Construction d'une architecture générale	40
2.1.3. Modélisation de l'architecture générale	46
2.1.4. Applications de la méthodologie de modélisation.....	55
2.2. Extension à des véhicules mixtes à 4 sources électriques	60
2.2.1. Approche	60
2.2.2. Construction d'une architecture générale	61
2.2.3. Modélisation de l'architecture générale	65
2.2.4. Applications de la méthodologie de modélisation.....	65
2.3. Conclusions	75
<i>3. Commande de VEs et de VEHS mixtes</i>	77
3.1. Commande de VEs mixtes à 3 sources électriques	79
3.1.1. Cadre de l'étude	79
3.1.2. Commande d'une voiture électrique mixte.....	81
3.1.3. Commande d'un microbus électrique mixte	95
3.2. Commande de véhicules mixtes à 4 sources électriques	101
3.2.1. Approche	101
3.2.2. Commande d'une voiture électrique hybride mixte	102
3.2.3. Commande d'un métro électrique mixte	107
3.3. Conclusion	119
<i>4. Influence des stratégies de gestion de l'énergie</i>	121
4.1. Cadre de l'étude	123
4.1.1. Approche	123
4.1.2. Dimensionnement des bancs de batteries et supercondensateurs	124
4.1.3. Critères de comparaison.....	129
4.2. Stratégies de base	131
4.2.1. Généralités.....	131
4.2.2. Mise en place de stratégies de base	133
4.2.3. Comparaison	138

4.3. Stratégies plus évoluées	144
4.3.1. Approche	144
4.3.2. Mise en place de stratégies plus évoluées	145
4.3.3. Comparaison	147
4.3.4. Influence des paramètres à fixer.....	151
4.3.5. Influence du cycle	152
4.3.6. Bilan	153
4.4. Influence des stratégies sur le dimensionnement.....	155
4.4.1. Redimensionnement du banc de batteries du VE mixte.....	155
4.4.2. Comparaison des performances pour les deux dimensionnements	156
4.4.3. Bilan	158
4.5. Validation expérimentale sur le microbus électrique mixte	159
4.6. Conclusion.....	159
<i>Conclusion Générale.....</i>	<i>163</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>167</i>
Annexe A : Architectures de VEHS.....	169
Annexe B : Architectures possibles pour VE mixtes	171
Annexe C : Représentation Energétique Macroscopique.....	173
Annexe D : Modélisation des batteries Pb et Ni-MH du L2EP.....	177
Annexe E : Caractéristiques des bancs de supercondensateurs du L2EP	190
Annexe F : Synthèse des correcteurs	194
Annexe G : Simulation « Hardware-In-The-Loop » (HIL) à échelle réduite pour la voiture électrique mixte	197
Annexe H : Expérimentations réalisées pour le métro électriques mixte	200
Annexe I : Calcul du courant de référence pour la stratégie « fonction des résistances internes ».....	205
Annexe J : simulations du VE mixte pour différentes stratégies de gestion de l'énergie évoluées.....	207
Annexe K: Comparaison des performances du VE mixte pour différents dimensionnements des batteries	212
Annexe L : Résultats expérimentaux du microbus électrique pour différentes stratégies	214
<i>Glossaire</i>	<i>217</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>221</i>

Introduction générale

Les véhicules automobiles conventionnels utilisant un moteur à essence ou diesel se trouvent dans une situation critique due à leur forte dépendance vis-à-vis du pétrole, leur contribution à l'accroissement de l'effet de serre et à l'augmentation de la pollution atmosphérique.

Le transport routier du futur devra donc à la fois concilier diversification énergétique, maîtrise des émissions de CO₂ et maîtrise des émissions polluantes. Différentes solutions alternatives visent à répondre à ce challenge : amélioration des véhicules « tout thermique », utilisation de biocarburants, développement de Véhicules Electriques (VEs) et de Véhicules Electriques Hybrides (VEHs), etc.

Les solutions VE et VEH nécessitent de stocker à bord du véhicule de l'énergie électrique. Pour les véhicules existants sur le marché automobile, le stockage se fait principalement par batteries et pose un certain nombre de problèmes : autonomie, durée de vie, durée de recharge... Le stockage de l'énergie électrique peut également se faire au moyen de supercondensateurs, d'inductances supraconductrices, de systèmes à Pile A Combustible (PAC), à volant d'inertie ou à air comprimé. Cependant aucun de ces Systèmes de Stockage d'Energie (SSE) n'excellent à la fois sur les critères d'énergie, de puissance massique, de durée de vie, de recyclabilité, de sécurité et de coût, critères déterminants pour une application véhicule viable.

Un moyen pour répondre à ces problématiques consisterait à associer deux SSE électriques, choisis de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. On appellera cette association SSE mixte ; elle permettrait de pallier les lacunes de chaque SSE électrique pris séparément et d'allier leurs avantages respectifs pour obtenir un bon compromis sur l'ensemble des critères considérés. Différentes associations sont envisageables pour obtenir un SSE électrique mixte présentant les meilleurs atouts pour une application véhicule.

Dans ce contexte, le réseau scientifique national MEGEVH (Modélisation Energétique et Gestion Electrique des Véhicules Hybrides) sur les véhicules électriques hybrides a été mis en place dès 2004. L'objectif de ce groupe est de favoriser les collaborations entre partenaires académiques et industriels sur les thèmes de la modélisation et de la gestion d'énergie des VEHs et de contribuer ainsi à leur émergence. Les projets MEGEVH se répartissent sur plusieurs thématiques, dont MEGEVH-stockage qui s'intéresse aux sous systèmes de stockage d'énergie pour VEs et VEHs. Cette thèse s'inscrit dans cette thématique et s'articule avec les divers projets engagés par le réseau MEGEVH. Elle est centrée sur les SSE électriques mixtes sous la direction du L2EP (Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille) et du LTE (Laboratoire Transport et Environnement) de l'INRETS (Institut National de Recherche sur le Transport et leur Sécurité). Elle a bénéficié en particulier des travaux effectués dans MEGEVH-macro sur la modélisation des éléments de stockage et sur les systèmes de traction [BOULON 09], [CHEN 10], et des travaux réalisés dans MEGEVH-stratégie sur la gestion de l'énergie et l'utilisation des supercondensateurs dans les VEHs [LHOMME 07]. Cette thèse a également bénéficié de l'expérience du L2EP sur l'outil REM (Représentation Energétique Macroscopique) et de celle du LTE notamment sur la modélisation, l'utilisation des batteries et la gestion de l'énergie dans les VEHs et VEs.

Dans un véhicule mixte, plusieurs sources d'énergie électrique peuvent être utilisées pour assurer sa traction. Ces sources peuvent être associées de façon passives ou actives. Il existe de nombreuses architectures possibles d'association, d'autant plus que le nombre de sources est important. De nombreux travaux sont en cours sur des SSE électriques mixtes, en particulier l'association batteries / supercondensateurs. On peut d'abord remarquer que le choix du dimensionnement des divers SSE électriques est peu explicite. D'autre part la gestion d'énergie de SSE électriques mixtes est souvent développée de manière heuristique.

L'objectif de la thèse vise à proposer une méthodologie d'étude des associations de sources électriques pour VEs et VEHS de façon à en déduire des règles de modélisation, de commande et de dimensionnement. La méthodologie mise en place utilise la REM pour organiser les systèmes étudiés selon une approche systémique et permettre une meilleure analyse de systèmes et des flux d'énergie mis en œuvre. Elle est d'abord développée pour des VEs à trois sources électriques puis étendue à des VEHS et VEs à 4 sources électriques.

Ce mémoire de thèse se divise en 4 chapitres.

Le premier chapitre fait un état de l'art de la situation actuelle du transport terrestre et montre comment la production et le stockage mixte de l'énergie électrique, c'est-à-dire qui utilisent plusieurs sources d'énergie électrique, pourraient être des solutions intéressantes pour les véhicules du futur.

Le deuxième chapitre propose une méthodologie de modélisation de VEs et VEHS avec SSE électriques mixtes et utilise la REM. Cette méthodologie vise à mieux appréhender un système multi-sources, de comparer et de tester différentes architectures possibles pour un même véhicule. Elle est appliquée à divers VEs et VEHS.

Le troisième chapitre est consacré à la structuration de la commande de VEs et de VEHS avec SSE électriques mixtes. L'outil REM est à nouveau utilisé pour définir une structure de commande (commande locale) et une stratégie de gestion de l'énergie (commande globale). Les structures de commande développées pour les applications du deuxième chapitre sont validées en simulation et en expérimentation en utilisant des stratégies de gestion de l'énergie simples.

Enfin le chapitre 4 se concentre sur des stratégies de gestion de l'énergie plus complexes et étudie leur influence pour un véhicule mixte sur la consommation d'énergie électrique du banc de batteries, sa durée de vie et son dimensionnement. Ces stratégies ont été vérifiées par simulation sur une voiture électrique mixte et certaines d'entre elles ont été validées expérimentalement sur un microbus électrique mixte réel.

1

Stockage Mixte de l'Énergie Électrique pour VEs et VEHS

L'objectif de ce chapitre vise à montrer comment la production et le stockage mixte de l'énergie électrique semblent des solutions intéressantes pour les véhicules du futur. Dans la perspective de répondre aux problèmes actuels des transports terrestres, un cahier des charges va être défini pour les véhicules du futur. Les solutions actuelles permettant d'y répondre seront analysées ainsi que leurs limites. La production et le stockage mixte multi-sources de l'énergie électrique vont être présentés comme des moyens permettant d'améliorer ces solutions. Enfin différentes architectures d'associations de sources électriques, ainsi que les modèles des sources de stockage d'énergie électrique utilisés par la suite, vont être présentés.

1.1. Intérêt de la production mixte de l'énergie électrique

Après avoir défini le vocabulaire employé par la suite, un cahier des charges d'un véhicule idéal du futur sera exposé. Les solutions permettant d'y répondre aujourd'hui seront analysées ainsi que leurs limites. Le stockage mixte de l'énergie électrique sera présenté comme un moyen d'améliorer les solutions existantes.

1.1.1. Définitions

De façon générale, un système formé d'éléments d'origine ou de nature différente est qualifié d'« hybride » ou de « mixte ». Dans le domaine des transports, le mot « hybride » est privilégié, on parlera notamment de **Véhicule Hybride (VH)**. Cependant, la notion d'hybridation n'est pas identique suivant le domaine de transport considéré. De plus, le stockage de l'énergie électrique à bord des véhicules électriques ou hybride peut être réalisé au moyen de plusieurs sources électriques, et à ce moment là, le stockage peut également être qualifié de « stockage hybride ». Aussi, après avoir exposé les différentes définitions généralement utilisées pour un VH, nous tenterons d'établir une définition générale du VH et de voir comment incorporer la notion d'hybridation au niveau d'un **Système de Stockage d'Énergie (SSE)** électrique.

Le domaine des transports se partage en trois familles classées suivant le type de voies utilisées : transport terrestre, maritime ou aérien. On distingue deux types de transport terrestre : le transport routier qui s'exerce sur route (voiture, bus, poids lourds) et le transport guidé qui s'effectue sur des voies ferrées (train, tramway) ou guidées (métro).

Classiquement, dans le domaine des transports routiers, un véhicule utilise une source d'énergie fossile embarquée (essence ou diesel) tandis que dans le domaine des transports guidés, cela sera plutôt une source d'énergie électrique stationnaire (caténaire, rail d'alimentation). Ainsi, dans le domaine des transports routiers, un VH est généralement défini comme étant un véhicule ayant deux sources d'énergie de nature différente qui assurent sa traction. Généralement, la deuxième source d'énergie est de nature électrique, c'est le cas par exemple de la Prius hybride de Toyota [OLSZEWSKY 06], et on parle alors de **Véhicule Électrique Hybride (VEH)**.

En revanche, dans le domaine des transports guidés, un véhicule peut être qualifié communément de VH lorsqu'il a deux sources d'énergie de même nature qui assurent la traction du véhicule. Généralement, les deux sources sont de nature électrique, c'est le cas par exemple d'un tramway alimenté par caténaire et supercondensateurs.

Par la suite, nous qualifierons de **Véhicule Thermique (VT)**, un véhicule qui utilise une seule source d'énergie de nature fossile (Figure 1-1.a). Si par contre la source d'énergie est de nature électrique, le véhicule sera qualifié de **Véhicule Électrique (VE)** (Figure 1-1.b, c).

Nous définirons de manière générale un **Véhicule Hybride (VH)** comme étant un véhicule pour lequel la traction est assurée par deux sources d'énergie de nature différente (fossile, électrique...). Ces deux sources peuvent être toutes deux embarquées ou stationnaires, ou les deux. Si une des deux sources est de nature électrique, nous qualifierons le véhicule de **Véhicule Electrique Hybride (VEH)** (Figure 1-1.d).

Nous définirons de manière générale un **Véhicule mixte** comme étant un véhicule pour lequel au moins deux des sources qui assurent sa traction sont de même nature. Ces sources peuvent être embarquées ou stationnaires ou les deux. Si l'ensemble des sources est électrique, nous parlerons de **VE mixte** (Figure 1-1.e-g, i-l). Si au moins deux des sources sont de nature électrique et les autres de nature différente, nous parlerons de **VEH mixte** (Figure 1-1.h).

Quatre applications vont être traitées par la suite pour valider notamment les méthodologies de modélisation et de commande développées aux chapitres 2 et 3. La première application est une voiture qui utilise deux sources d'énergie électrique, des supercondensateurs et des batteries, que nous nommerons par la suite « voiture électrique mixte » ou « VE mixte » (Figure 1-1.e). La deuxième application est un microbus qui utilise également l'association batteries / supercondensateurs (Figure 1-1.e) [BOUJELBEN 08]. Nous le qualifierons par la suite de « microbus électrique mixte ». La troisième application est une voiture qui utilise trois sources d'énergie, une de nature fossile (essence) et les deux autres de nature électrique que nous qualifierons par la suite de « voiture électrique hybride mixte » ou de « VEH mixte » (Figure 1-1.h). Enfin la quatrième application est un métro sans rail d'alimentation [ALLEGRE 10b]. Un banc de supercondensateurs embarqué lui permet d'être autonome entre deux stations. Quand le métro est en station, le réseau ainsi qu'un autre banc de supercondensateurs en station rechargent le banc de supercondensateurs embarqué et participent à la phase d'accélération du métro. Nous qualifierons ce véhicule par la suite de « métro électrique mixte » ou de « VE mixte » (Figure 1-1.k).

1.1.2. Cahier des charges d'un véhicule idéal du futur

Dans la perspective de répondre aux problèmes actuels des transports terrestres, un cahier des charges va être défini pour les transports routiers et guidés du futur.

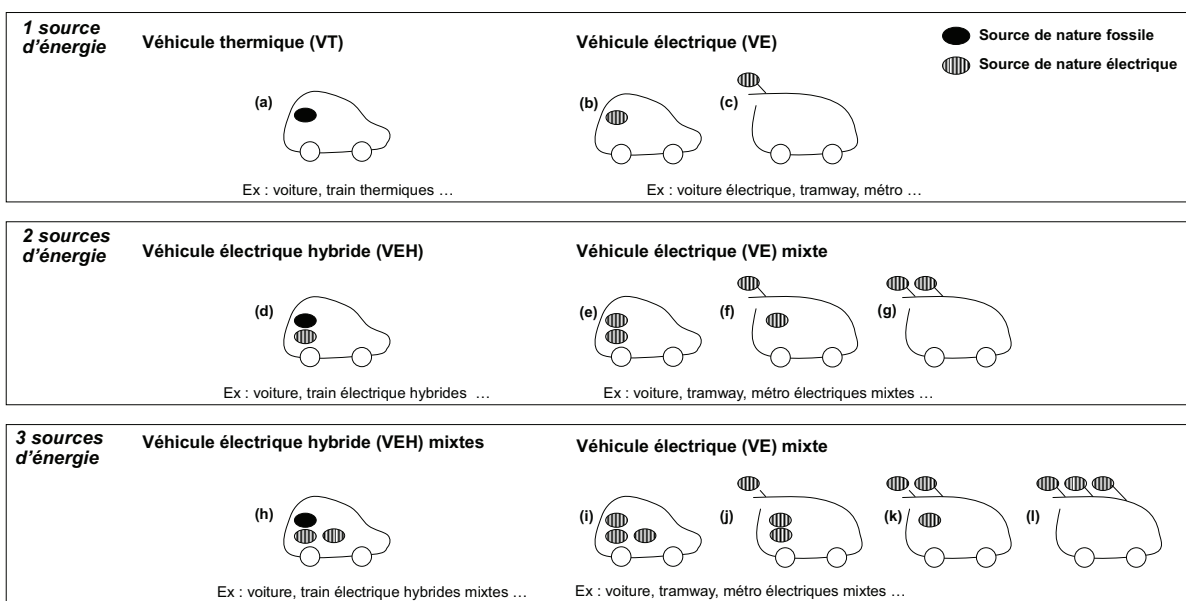
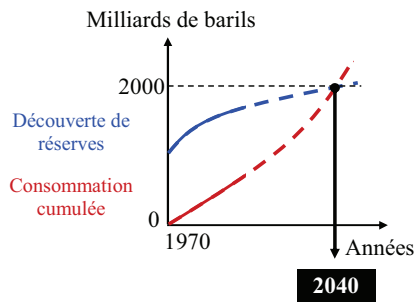


Figure 1-1. Classification des véhicules

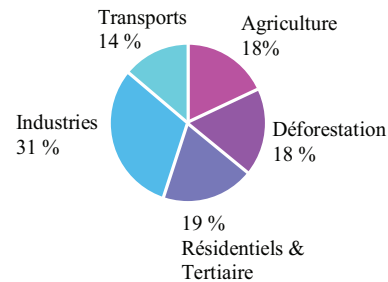
1.1.2.1. Cahier de charges des transports routiers du futur

Le transport routier classique utilisant une source d'énergie fossile se trouve dans une situation critique due à sa forte dépendance vis-à-vis du pétrole, sa contribution à l'accroissement de l'effet de serre et à l'augmentation de la pollution atmosphérique.

L'essence et le diesel qui constituent l'essentiel des carburants actuels sont fabriqués à partir du pétrole. Or les réserves de pétrole sont de plus en plus rares. En prenant en compte la découverte de nouvelles réserves et la consommation future de pays en plein essor, l'épuisement des réserves mondiales serait estimé pour 2040 (Figure 1-2) [EHSANI 05].



1.1. Figure 1-2. Pénurie de pétrole



1.2. Figure 1-3. Secteurs émetteurs de CO₂

Au niveau mondial, les transports représentent 14% des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et les transports routiers sont à l'origine de 94% de ces émissions (Figure 1-3) [GIEC 07], [WORLD 10]. En France, la part des émissions de CO₂ liées aux transports est estimée à 37% dont 13% pour les voitures particulières [AUTO 08]. Ces émissions de CO₂ sont causées par la combustion des carburants dans les moteurs thermiques. Le CO₂ intervient avec d'autres gaz dans le phénomène dit « d'effet de serre ». Ce phénomène à l'origine naturel est indispensable à la vie sur Terre puisqu'il permet de réchauffer l'atmosphère jusqu'à une valeur de 15 °C. Cependant il a augmenté artificiellement au cours de ces dernières décennies à cause des gaz à effet de serre rejetés par les activités humaines. Cet effet de serre « forcé » serait directement responsable de l'élévation actuelle et future de la température moyenne de notre planète. Les conséquences d'un tel réchauffement sont multiples : élévation du niveau des mers, augmentation des catastrophes naturelles, disparitions d'espèces animales et végétales ... [CCFA 04], [ADEME 07].

La pollution atmosphérique liée aux transports, causée par le rejet de gaz d'échappement issus de la transformation du carburant après sa combustion, est en hausse constante surtout dans les grandes agglomérations de pays émergents. La situation est particulièrement préoccupante dans les zones urbaines et sont avérées nocives [CCFA 01].

Le transport routier du futur devra donc à la fois concilier les trois aspects suivants :

- diversification énergétique,
- maîtrise des émissions de CO₂,
- maîtrise des émissions polluantes.

1.1.2.2. Cahier des charges des transports guidés du futur

Concernant les transports guidés du futur, les attentes pour ceux qui utilisent une source d'énergie fossile sont identiques à celles des transports routiers, puisqu'ils se retrouvent confrontés aux mêmes problèmes : pétrole, émissions de CO₂, pollution. Cependant, hormis une partie des trains qui fonctionnent généralement au diesel (12% des Trains Rapides Nationaux (TRN) et 36% des Trains Express Régionaux (TER) en France), la plupart des transports guidés sont tout électriques et devront satisfaire d'autres contraintes.

L'alimentation en énergie électrique des transports guidés tels que les métros, les tramways et les trolleybus est généralement réalisée à l'aide de sous stations avec redresseurs, connectées au réseau de distribution. Généralement, le niveau de tension du bus continu est relativement bas et varie de 500 à 900V. Il est par exemple fixé à 750V pour les métros de Lille (France), à 600 V pour les trolleybus de Lausanne (Suisse) et à 650V pour les tramways de Toronto (Canada). Avec l'arrivée de nouveaux matériels roulants, le poids, la puissance et la vitesse des véhicules ont augmenté. Les conséquences sur l'alimentation se traduisent par une augmentation des contraintes en puissance et l'apparition d'importantes chutes de tension. Si celles-ci sont trop importantes et que la tension du bus continu chute en dessous d'une valeur limite, la puissance de traction est alors réduite et les performances des véhicules limitées. De plus, ces chutes de tension sont associées à des pertes joules sur la ligne [RUFER 04], [DESTRAZ 08].

Lors des phases de freinage, les machines électriques fonctionnent en mode génératrice et renvoient de l'énergie électrique vers le bus continu. Cette énergie ne peut pas être renvoyée vers le réseau de distribution car les sous stations avec redresseur utilisent généralement des ponts de diode non réversible en courant. Elle est donc soit utilisée par un autre véhicule circulant sur la même ligne, soit dissipée dans une résistance de freinage et / ou un frein mécanique si la tension du bus continu atteint sa limitation haute. Par exemple pour le métro VAL installé à Lille, cette limitation de tension s'élève à 900V. Globalement près de 50% de l'énergie réinjectée sur le bus continu est dissipée [ADINOLFI 98], [DESTRAZ 09].

Dans certaines zones, tels que le centre historique d'une ville ou certains lieux touristiques, la pose de caténaire apparente peut s'avérer gênante et inesthétique pour la préservation du patrimoine et l'image de la ville. C'est le cas notamment des lignes aériennes d'alimentation des trolleybus ou des tramways qui forment des sortes de toiles d'araignée aux croisements et bifurcations.

Le transport guidé électrique du futur devra donc privilégier les trois aspects suivants :

- réduction de la consommation électrique par une meilleure récupération de l'énergie au freinage,
- réduction des chutes de tension du bus continu d'alimentation,
- réduction de l'impact visuel des installations électriques dans certaines zones.

1.1.3. Solutions actuelles et leurs limites

Les solutions actuelles pour répondre aux cahiers des charges d'un transport routier et guidé vont être présentées ainsi que leurs limites.

1.1.3.1. Solutions pour les transports routiers

Les contraintes de réduction de l'utilisation du pétrole, des émissions de CO₂ et de polluants des transports routiers du futur sont directement liées à la consommation de carburant. Différentes solutions sont envisagées pour diminuer cette consommation : améliorations des solutions existantes, carburants alternatifs, véhicules électriques, véhicules hybrides ...

❖ Améliorations des véhicules thermiques (VT)

La première solution consiste à améliorer les VT dans le but d'obtenir des véhicules moins gourmands en carburant. Différentes techniques sont employées : l'injection directe qui permet d'améliorer le rendement du moteur, la diminution de la résistance à l'avancement...

Cependant, ces améliorations ne sont pas suffisantes : d'un côté on améliore le rendement du système de motorisation et d'un autre côté, face à une demande des consommateurs de toujours plus de confort et de sécurité (vitres électriques, climatisation, airbag ...), le système de motorisation est de plus en plus sollicité, donc de plus en plus puissant et consomme plus de carburant [CCFA 01, 04].

❖ *Biocarburants*

De nouveaux carburants d'origine végétale, dits « biocarburants » apparaissent sur le marché. Ils offrent une diversification énergétique par rapport au pétrole. En termes d'émissions de CO₂, l'usage des biocarburants semble être une idée séduisante puisque leur combustion revient à libérer le CO₂ capté par la plante au cours de sa croissance. On arrive ainsi à un « bilan carbone neutre » si on ne tient pas en compte des émissions de CO₂ rejetés pour produire ces biocarburants. On trouve des biocarburants liquides et gazeux.

Les biocarburants liquides les plus répandus sont le bioéthanol (90%) et le biodiesel (10%). Le biodiesel est principalement produit en Europe à partir de d'huiles végétales de colza ou de tournesol. Le bioéthanol est produit à partir de la fermentation des sucres de betteraves, de canne à sucre ou de céréales et connaît un essor fulgurant notamment au Brésil et aux Etats-Unis qui produisent à eux seuls 90% de la production mondiale. Au Brésil, il couvre actuellement 50% des besoins en carburant des véhicules légers soit sous forme de mélange soit sous forme d'éthanol pur. Il doit son succès à la commercialisation depuis 2003 de voitures, dites Flex-Fuel Vehicules (FFV), qui peuvent rouler aussi bien à l'essence qu'à l'éthanol (Figure 1-4) [ENERGIE 10].

Cependant, si les biocarburants liquides semblent une source d'énergie viable dans des pays comme le Brésil qui possèdent suffisamment de terres agricoles pour développer cette industrie, ils ne peuvent pas constituer une solution unique alternative au pétrole. En effet, à l'échelle mondiale pour subvenir uniquement à nos besoins en carburant pour les transports, il faudrait disposer de 850 millions d'hectares soit 60% de la Surface Agricole Utile (SAU) mondiale. De plus, la culture dans le but de produire des biocarburants liquides participe en grande partie à la déforestation, notamment celle de la forêt amazonienne et son essor se fait au détriment de l'élevage et des cultures vivrières. Autre point sensible, la demande des biocarburants liquides influence les prix agricoles notamment des céréales et oléagineux et faisant concurrence au marché de l'agroalimentaire [POOL 06], [ENERGIE 10].

Il existe également des biocarburants gazeux ou biogaz. Le biogaz est la forme renouvelable du gaz naturel. En effet, contrairement au gaz naturel principalement constitué de méthane d'origine fossile, le méthane constituant le biogaz est produit à partir de la biomasse. L'avantage du biogaz est qu'il peut être directement utilisé comme carburant sur un moteur à allumage commandé. Sa combustion engendre moins de rejet d'émissions polluantes que la combustion d'essence ou de diesel. Le bilan carbone du biogaz est considéré comme « quasi neutre » puisque le CO₂ rejeté dans l'atmosphère lors de sa combustion est d'origine biologique. Autre avantage du biogaz, il existe une grande disponibilité des ressources en biomasse utile à sa production sans perturbation de la chaîne alimentaire. Actuellement, la trop faible densité des stations-service constitue cependant un frein à l'essor de véhicules au biogaz. De plus sa production est onéreuse et a lieu loin des lieux de consommation et donc difficile à valoriser (Figure 1-5).

❖ *Véhicule électrique*

Le véhicule électrique (VE) semble être la solution idéale car il n'utilise pas de carburant dans son fonctionnement.



Figure 1-4. Ford focus Flex-Fuel (www.ford.fr) Figure 1-5. Bus lillois au biogaz (www.biogasmax.fr)

Le moteur électrique, utilisé pour la traction, ne présente que des avantages par rapport à un moteur thermique ; il est quasi silencieux, exempt de vibrations, léger, réversible, a un très bon rendement, une longue longévité, ne demande pas d'entretien et ne rejette aucun composé chimiques [CHAN 04], [CHAN 07]. Deux projets de lancement de la voiture électrique à grande échelle sont prévus pour 2011 en Israël et au Danemark. Ils associent la société Better Place et le constructeur automobile Renault-Nissan. Renault-Nissan fournira les véhicules électriques avec batteries au lithium-ion tandis que le rôle de la société américaine Better Place sera d'établir un réseau de bornes de recharge des batteries et un service d'échange des batteries sur l'ensemble du territoire (Figure 1-6) [RENAULT 10].



Figure 1-6. Station d'échange de batteries proposée par Better Place (www.renault.fr)

Cependant, il faut souligner que le bilan global d'un VE en termes d'émission de CO₂ dépend fortement du moyen de production de l'électricité [VOELCKER 09].

De plus, les VEs sont pour la plupart alimentés par batteries ce qui pose un certains nombres de problèmes. D'abord, de part la faible densité énergétique des batteries comparée à celle du carburant, l'autonomie d'un VE est fortement réduite.

Il faut en moyenne environ 100 kg de batteries pour contenir autant d'énergie que dans 1 kg d'essence. Faisons l'hypothèse qu'un réservoir d'essence pèse 40 kg et permet au véhicule une autonomie de 750 kms. En termes d'énergie, il est équivalent à environ 4 000 kg de batteries. Cependant, le rendement d'un moteur thermique étant très mauvais comparé à celui d'un moteur électrique, l'énergie à embarquer dans un VE est environ 3 fois moins importante que celle à embarquer dans un véhicule conventionnel. Le poids des batteries à embarquer dans un VE est ramené à environ 1300 kg. Evidemment en pratique, embarquer autant de batteries n'est pas envisageable. La masse d'un moteur thermique et de son réservoir équivaut à environ celle d'un moteur électrique (plus léger) et de 200 kg de batterie. A poids de véhicules comparable, l'autonomie du véhicule est alors fortement réduite et ramenée pour notre exemple à 100 kms (Figure 1-7). Parmi les voitures électriques présentes sur le marché 2010 et à venir, la voiture électrique BlueCar, développée par le groupe Bolloré en 2005 et équipée de 200 kg de batteries lithium-métal-polymère, est autonome 200 à 250 kms, soit environ 4 fois moins qu'un véhicule conventionnel, pour une vitesse maximale de 130 km/h, (Figure 1-8) [ROBY 06] [CHAN 07].

Le deuxième point sensible est le temps de recharge des batteries. Charger rapidement une batterie signifie lui fournir de l'énergie sur un temps très court. Ceci est possible si la densité de puissance (densité d'énergie par unité de temps) de charge de la batterie est importante. Or dans ce domaine, les batteries sont loin d'exceller.

A titre d'exemple, les batteries lithium-métal-polymère de la BlueCar nécessitent un temps de recharge à 100% de six heures sur une prise secteur classique 16 A (Figure 1-8) [CLEAN 07].

Autre point sensible, l'utilisation des batteries seules pour assurer la traction du véhicule les exposent à des pics de puissance répétés et à une suite de cycles de charge / décharge qui ont pour conséquence de réduire sensiblement leur durée de vie. Enfin leur prix de revient et la nécessité d'infrastructures pour recharger et ou échanger les batteries constituent encore un frein important à l'essor de ce type de véhicule.

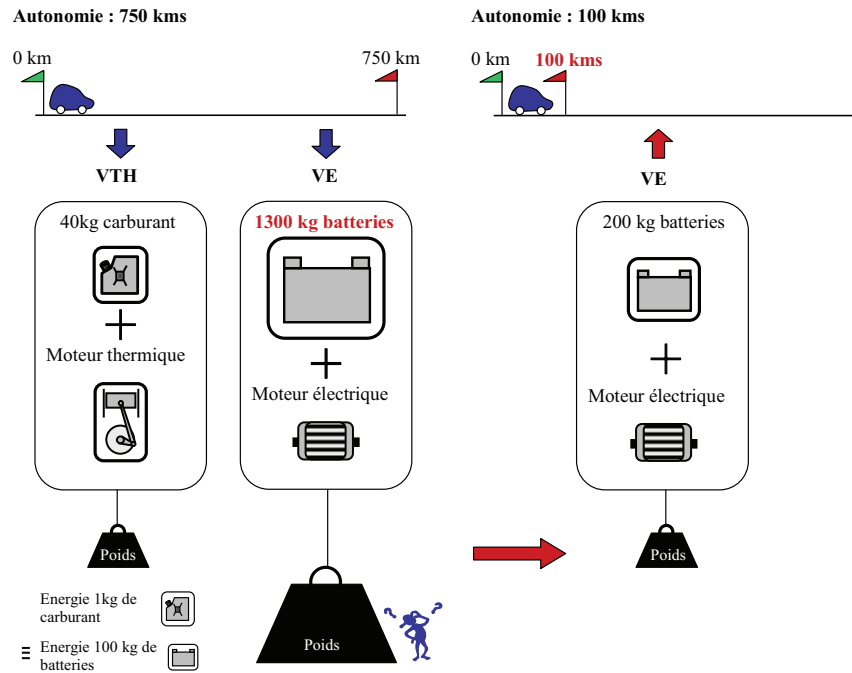








Figure 1-7. Pourquoi les VE ont-ils une faible autonomie ?

La Mega City	La Reva	La Smart EV	La Th!nk City	La Cleanova II	La BlueCar
Société Aixam Mega	Groupe RECC	Société Zyteck	Société Th!nk	SVE/Groupe Dassault	Groupe Bolloré
					
A : 60-80 kms	A : 70-100 kms	A : 120 kms	A : 180 kms	A : 210 kms	A : 200-250 kms
V : 65 km/h	V : 80 km/h	V : 68 km/h	V : 100 km/h	V : 130 km/h	V : 130 km/h
B : Plomb	B : Plomb	B : Zebra	B : Lithium-ion ou Zebra	B : Lithium-ion	B : Lithium-métal-polymère
R : 8 h	R : 6 h	R : 8 h	R : 8-10 h	R : 8 h	R : 6 h
D : 2008	D : 2008	D : 2010	D : 2008-2009	D : 2009-2010	D : 2009-2010

Automonomie →

A : Autonomie V : Vitesse maximale B : technologie de batteries R : Temps de recharge des batteries D : Disponibilité sur le marché

Figure 1-8. Principales voitures électriques disponibles en 2010 et à venir

Des VE avec piles à combustible sont à l'étude. En effet, avec une réserve de **dihydrogène (H₂)** et une **Pile A Combustible (PAC)**, il devient possible de produire de l'électricité directement à bord sans émissions de CO₂.

Cependant la production, l'approvisionnement en H₂ et son stockage à bord, ainsi que le rendement des piles à combustible et la sécurité pour une application véhicule posent problème [MOS-CADE 03], [CEA 04], [ACCESS 07], [CHAN 07], [CHRENKO 08].

Le H₂ est l'un des éléments les plus abondants de la planète. Cependant il n'est pas directement disponible dans la nature car il est toujours associé à d'autres atomes (l'oxygène dans le cas de l'eau, le carbone dans le cas du gaz naturel). Le H₂ peut être obtenu soit par reformage d'énergies fossiles, soit par électrolyse de l'eau soit par gazéification de la biomasse. Actuellement, la production de H₂ se fait principalement par reformage du gaz naturel car c'est le moyen le moins onéreux et le plus rentable en termes de volume de production, mais également celui qui rejette le plus de CO₂.

Pour que les automobilistes puissent se ravitailler en H₂, il faudrait installer des stations service distribuant du dihydrogène. Des réseaux de distribution de dihydrogène existent déjà dans différents pays pour approvisionner les industries chimiques et pétrochimiques, cependant le coût de telles in-

frastructures se chiffrent en milliards d'euros tandis que le coût d'une station service est de quelques millions d'euros.

Le stockage de H₂ embarqué peut se faire sous forme gazeuse dans des réservoirs haute pression (350 ou 700 bar) qui sont lourds et encombrants, ou sous forme liquide à -253°C dans des réservoirs cryogéniques mais qui sont très chers. Une autre solution est de produire l'H₂ directement à bord du véhicule par un procédé de reformage à partir d'hydrocarbure liquide mais cette solution intermédiaire est émettrice de CO₂, la combustion n'étant pas totalement supprimée. Le stockage à bord est également coûteux, de l'ordre de 4000 à 5000 € contre 125 € pour un réservoir de carburant fossile.

De plus, le rendement d'une pile à combustible débitant un courant non nul est de 50 à 60%, sans tenir compte des accessoires qu'elle nécessite : compresseur, circuit de refroidissement de la pile... Autre point sensible, l'hydrogène est inflammable et explosif, il faut donc mettre en place des dispositifs de sécurité permettant d'éviter tout risque de fuite.

Actuellement, il existe environ quelques centaines de véhicules équipés de piles à combustible et une centaine de stations service à dihydrogène dans le monde (Figure 1-9).



Figure 1-9. Station à H₂ (www.total.fr, www.mini.fr)

❖ Véhicule électrique hybride

Le véhicule hybride (VH) a été développé pour combiner les avantages du véhicule conventionnel et du VE. Dans un VH, deux sources d'énergie embarquées de nature différente participent à sa traction. Pour un **Véhicule Electrique Hybride (VEH)**, la première source est du carburant alimentant un moteur thermique et la deuxième est composée de batteries alimentant une machine électrique (cf. 1.1.1).

La propulsion d'un VEH est assurée (Figure 1-10, a, b, c):

- soit par le moteur thermique seul, la machine électrique étant à l'arrêt (mode traction tout thermique),
- soit par la machine électrique fonctionnant en moteur, le moteur thermique étant à l'arrêt (mode traction tout électrique),
- soit par le moteur thermique et la machine électrique fonctionnant en moteur (mode traction hybride).

La recharge des batteries se fait également suivant trois manières (Figure 1-10, d, e, f):

- soit uniquement par le moteur thermique quand celui-ci assure la traction du véhicule (mode charge tout thermique),
- soit uniquement par la machine électrique fonctionnant en génératrice lors d'un freinage récupérateur (mode charge tout électrique),
- soit par les deux moteurs simultanément (mode charge hybride).

Ainsi, la motorisation hybride permet d'utiliser au mieux les capacités de chacun des moteurs suivant les conditions de roulage et de récupérer l'énergie pendant les phases de décélération. Par conséquent, les VEHs présentent un meilleur rendement et une consommation plus faible de carburant que les véhicules conventionnels [TRIGUI 03], [BADIN 97], [EHSANI 07] [EMADI 08].

Les VEHs peuvent se classer suivant leur taux d'hybridation ou leur architecture (Annexe A). Lorsqu'ils sont classés suivant leur taux d'hybridation, ils se différencient suivant la fonction de la

machine électrique. On distingue trois catégories d'hybridation: micro-hybrid, mild-hybrid et full-hybrid [CHAN 07], [CHAN 10].

Micro-hybrid – La machine électrique ne participe pas à la traction du véhicule et a pour unique fonction de démarrer le moteur thermique (alternateur-démarrateur). Chaque fois que le véhicule s'arrête, le moteur thermique est arrêté et est redémarré par la machine électrique (fonction stop & start). Un véhicule micro-hybrid est un légèrement plus cher qu'un véhicule conventionnel et est intéressant notamment en ville où les arrêts sont fréquents. Typiquement pour un véhicule classique, la puissance de la machine électrique est de 3 à 5 kW. La C3 stop & start développée par Citroën est un véhicule micro-hybrid (Figure 1-11).

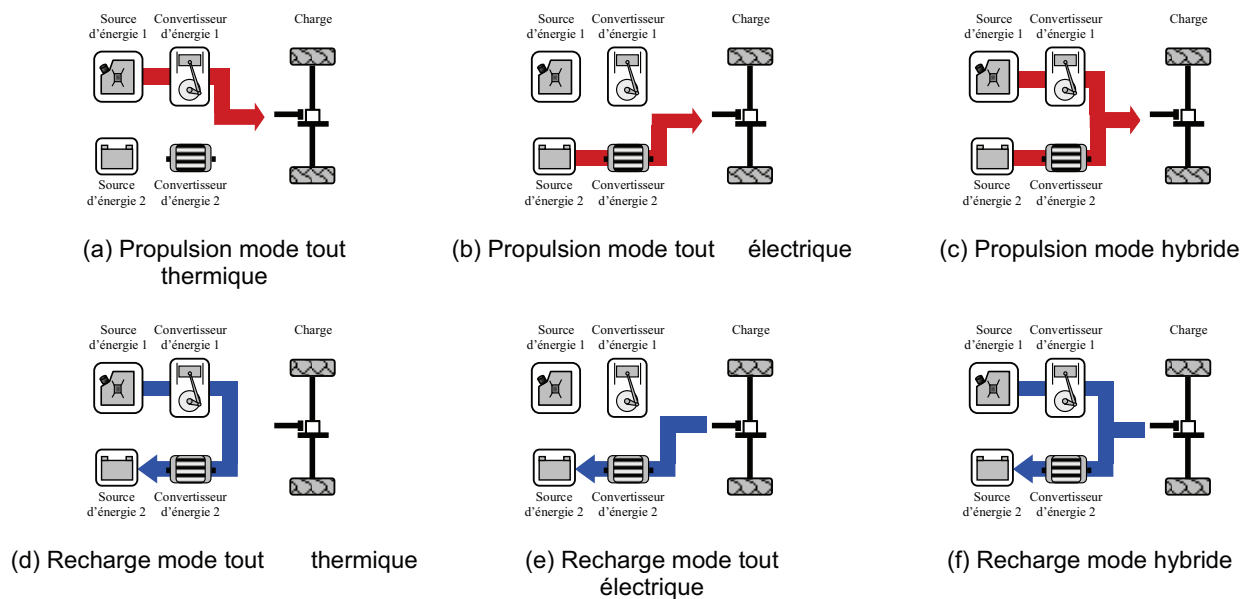


Figure 1-10. Propulsion et recharge des batteries dans un VEH

Mild-hybrid – La machine électrique est utilisée au démarrage, peut assister le moteur thermique pour la traction du véhicule et peut également être utilisée lors des phases de décélération pour recharger les batteries. Le moteur thermique est plus petit que celui d'un véhicule conventionnel. Typiquement, la puissance de la machine électrique varie entre 10 et 20 kW. La Honda Civic et la Honda Insight appartiennent à cette catégorie d'hybride (Figure 1-11).

Full-hybrid - La traction du véhicule peut être assurée par la machine électrique seule, par le moteur thermique seul ou par les deux moteurs. La machine électrique est également utilisée en génératrice pour recharger les batteries. Typiquement, la puissance de la machine électrique varie entre 30 et 50 kW. La Toyota Prius et la Lexus GS 450h sont des véhicules full-hybrid (Figure 1-11).

La réduction de consommation de carburant et d'émissions de CO₂ dans un VEH est fortement liée à son taux d'hybridation. Ainsi sur cycle urbain, un « micro-hybrid » permet de réduire jusqu'à 10% de la consommation de carburant et jusqu'à 5 à 10% les émissions de CO₂, et un « full hybrid » de 30 à 50% la consommation de carburant et de 20 à 40% les émissions de CO₂. Les résultats sont encore meilleurs quand la part d'électrification devient plus importante comme c'est le cas des VEHs rechargeables (Figure 1-12) [TRIGUI 09].

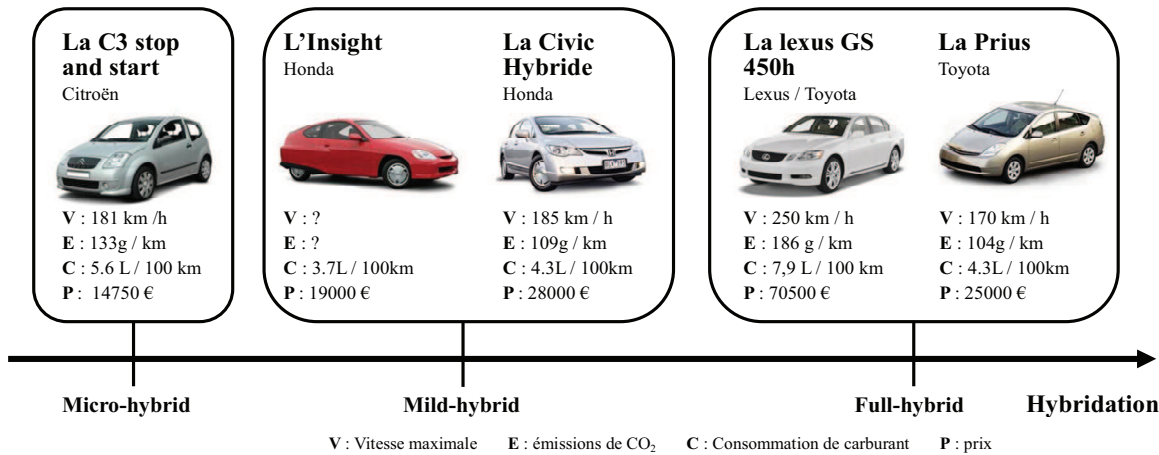
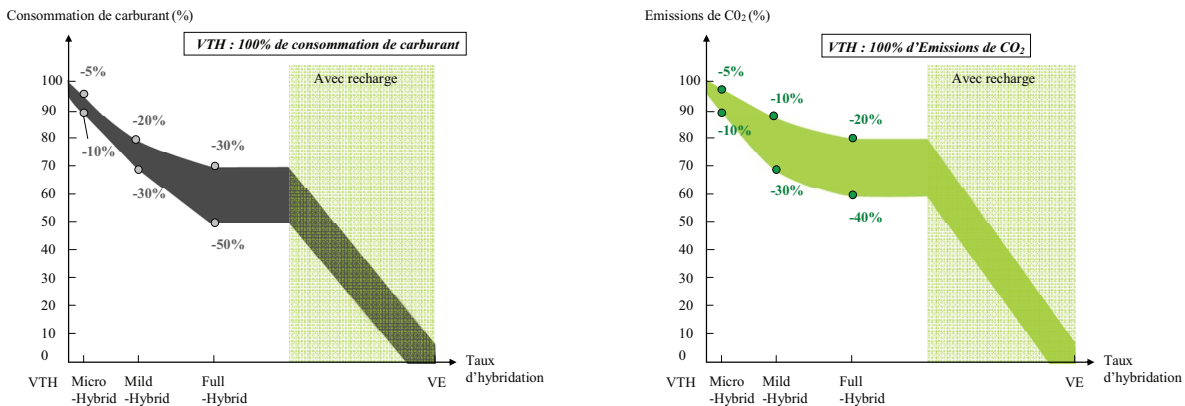


Figure 1-11. Principaux VEHs disponibles en 2010

Même si le VEH ne permet pas de résoudre totalement la dépendance de véhicule vis à vis du pétrole et n'est pas la meilleure solution concernant la réduction des émissions de CO₂, il semble un bon compromis dans l'immédiat jusqu'à l'introduction massive du VE. Le groupe Toyota a déjà vendu plus de 2 millions de voitures hybrides Toyota et Lexus.



1.3. Figure 1-12. Réduction de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ pour les VEHs

1.1.3.2. Solutions pour les transports ferroviaires

L'hybridation se développe aussi au niveau des véhicules ferroviaires tout thermique. Généralement, la première source est du diesel alimentant un moteur thermique et la deuxième est composée de batteries alimentant une machine électrique. On peut citer pour exemple le NE@Train développé par la compagnie japonaise JR-EAST et les trains Green Goat et RP développés par la société canadienne RailPower qui annonce des réductions de consommation de carburant de 40 à 60% et une réduction de émissions de CO₂ de 40 à 70% [AKLI 08].

Dans le transport ferroviaire électrique, il apparaît des VEs mixte. Pour les premiers types de VEs mixte, l'idée consiste à embarquer dans le véhicule un Système de Stockage d'Énergie (SSE) électrique. Ainsi, le véhicule peut être autonome pour traverser le centre ville ou les quartiers historiques sans caténaire apparente et l'impact visuel de l'installation est réduit. De plus, le SSE électrique permet de récupérer une partie de l'énergie de freinage du véhicule et ainsi de diminuer la consommation électrique du véhicule. On peut citer quelques exemples de tramways hybrides actuellement en circulation (Figure 1-13 et Figure 1-14) : le tramway hybride caténaire / volant d'inertie associé à une génératrice électrique de Rotterdam (Pays-Bas) développé par ALSTOM, le tramway hybride caténaire /

batteries Ni-MH de Nice (France) développé également par ALSTOM ainsi que le tramway hybride caténaire / supercondensateurs de Mannheim (Allemagne) développé par Bombardier [EVERS 06], [STEINER 07], [BARRERO 08], [AKLI 08], [DESTRAZ 08].

Pour les deuxièmes types de VEs mixte, l'idée consiste à coupler la caténaire ou le rail d'alimentation avec un SSE électrique. Ce SSE électrique est généralement placé en fin de ligne pour réduire les chutes de tension du bus continu d'alimentation. Ainsi les performances des véhicules sont constantes et le rendement du réseau de transport meilleur. De plus, une partie de l'énergie de freinage peut être stockée dans le SSE quand un véhicule passe à proximité. On peut citer pour exemple un projet développé à Londres par l'entreprise Urenco Power Technologies sur un réseau de tramway alimenté par une caténaire couplée à un volant d'inertie [RUFER 04], [FOIADELLI 06] [DESTRAZ 08].

On trouve également un troisième type de VE mixte pour lequel un SSE électrique est embarqué dans le véhicule et un autre SSE électrique est couplé à la caténaire ou le rail d'alimentation. Ainsi entre deux stations, le véhicule est autonome en énergie grâce au SSE électrique embarqué. En station, la caténaire ou le rail d'alimentation couplé au SSE électrique en station permettent de recharger le SSE embarqué, on parle de système d'alimentation par biberonnage [BARRADE 02, 03b]. Ils peuvent également participer en partie à la traction du véhicule pendant la phase d'accélération. On peut citer deux projets de VE mixte de ce type qui sont en cours de développement : le premier est une application tramway sans caténaire développé par Bombardier et le deuxième une application métro sans rail d'alimentation développé par Siemens Transportation System [PEREIRA 00], [JUFER 08], [ALLEGRE 10a]. Pour ces deux projets les SSE électriques embarqués et en station sont constitués de supercondensateurs.



Figure 1-13. Tramway hybride caténaire / volant d'inertie de Rotterdam (www.alstom.com)



Figure 1-14. Tramway hybride caténaire / batteries Ni-MH de Nice (www.alstom.com)

1.1.4. Stockage mixte de l'énergie électrique en perspective

Les différents moyens de stockage de l'énergie électrique vont être comparés. Le stockage mixte de l'énergie électrique sera présenté comme une solution envisageable pour les véhicules du futur.

1.1.4.1. Stockage de l'énergie électrique

Le stockage d'électricité apparaît comme le vrai défi des transports du futur aussi bien routiers que guidés. Pour stocker de l'énergie électrique, il faut d'abord la transformer en une autre forme d'énergie stockable puis effectuer la transformation inverse lorsqu'on désire à nouveau disposer d'électricité. L'énergie électrique peut être stockée sous différentes formes d'énergie : électrochimique (batteries), électrostatique (supercondensateurs), électromagnétique (inductances supraconductrices), mécanique (volant d'inertie ou air comprimé) ou gazeuse (H_2) (Figure 1-15). Le stockage d'énergie électrique sous forme d' H_2 nécessite l'ajout d'un élément de conversion, une **Pile A Combustible (PAC)**, qui permet de transformer l'énergie contenue potentiellement dans le H_2 en énergie électrique. De même, le stockage d'énergie électrique sous forme mécanique nécessite l'ajout d'un convertisseur mécanique / électrique généralement une **Machine Electrique (ME)**.

Avant de comparer les différents moyens de stockage, leurs principales caractéristiques vont être présentées [BEN HAMED 05].

Energie massique – C’est l’énergie stockée dans un kg, exprimée en Wh/kg. En réalité, l’énergie réellement extractible est inférieure à celle-ci car elle est fortement dépendante du rendement de charge et de décharge, et car les stockeurs ne peuvent pas toujours être déchargés complètement.

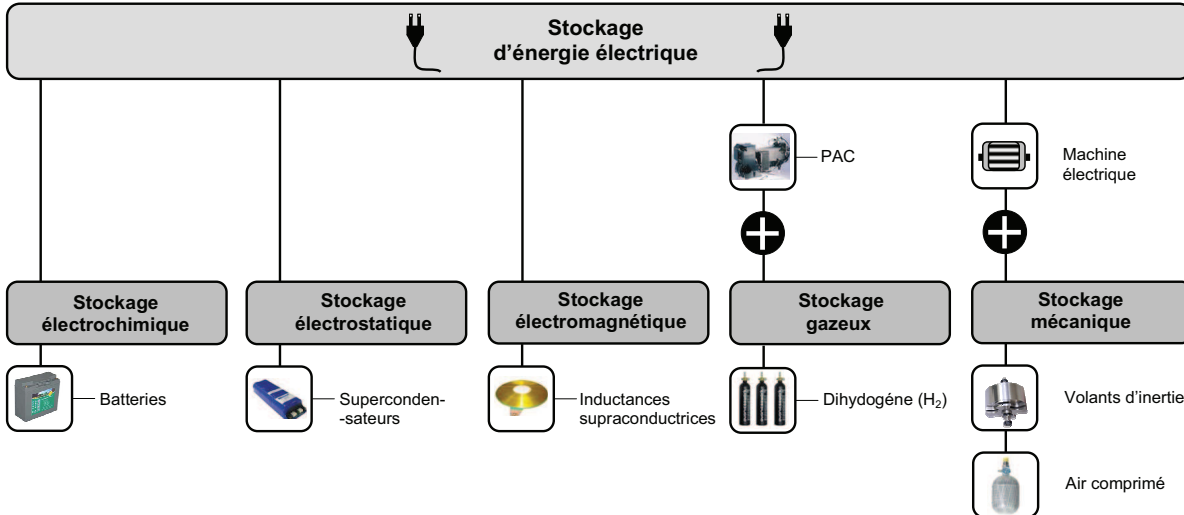


Figure 1-15. Stockage de l'énergie électrique

Puissance massique – Elle traduit la capacité pour une source de stockage de 1kg à générer une puissance et s'exprime en W/kg.

Durée de vie – Elle est caractérisée par le nombre maximal de cycles de charge et de décharge. Sa quantification est délicate car elle dépend de nombreux paramètres. Par exemple, celle des batteries est fortement liée au mode de cyclage, à la fenêtre d'état de charge utilisée et à la température.

Coût - C'est le coût d'investissement et de fonctionnement, exprimé généralement en € / kWh. Généralement ce sont les stockeurs les moins performants en termes de cyclabilité et de rendement qui sont les moins coûteux.

Recyclabilité – Elle permet de définir le caractère recyclable de la source considérée.

Sécurité – Elle permet d'évaluer les risques associés à l'utilisation d'une source de stockage. Elle est indispensable pour une application véhicule.

Classiquement, le diagramme de Ragone est utilisé pour comparer les performances en énergie massique et puissance massique des différents stockeurs. Cependant il lui est souvent reproché de ne se concentrer que sur ces deux critères alors que des critères tels que la cyclabilité ou la sécurité, sont tout aussi importants pour une application véhicule viable. Nous proposons de comparer les différents moyens de stockage de l'énergie électrique sur 5 indices de performances, à l'aide de diagrammes « araignée », suivant les 6 critères principaux exposés précédemment : densité de puissance, densité énergétique, durée de vie, prix, recyclabilité, sécurité. La répartition des indices de performances suivant les critères de comparaison est donnée Tableau 1-1 et Figure 1-16. Le **Système de Stockage d'Énergie (SSE)** électrique est d'autant meilleur pour le critère considéré que son indice de performance est élevé. Ainsi pour le critère de prix, plus l'indice de performance augmente, plus le prix décroît et plus SSE électrique devient intéressant d'un point de vue économique [BEN AHMED 05], [BURKE 07], [LUKIC 08].

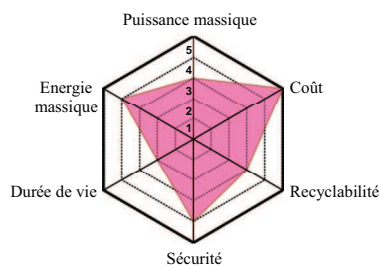
Le système PAC et les batteries sont les SSE électriques les plus intéressants en termes d'énergie massique (bien que très inférieure à celle du carburant, d'où une autonomie limitée). Ainsi ils pourraient être les SSE électriques privilégiés pour les applications VE. En terme de prix, les batteries sont

les plus compétitives cependant elles supportent mal le cyclage qui réduit sensiblement leur durée de vie. Des incertitudes demeurent pour se système PAC notamment sur les critères de recyclabilité, durée de vie et de prix. De plus, la sécurité de fonctionnement reste également à garantir ; l'H₂ peut être inflammable et explosif s'il y a fuite en cas d'accident.

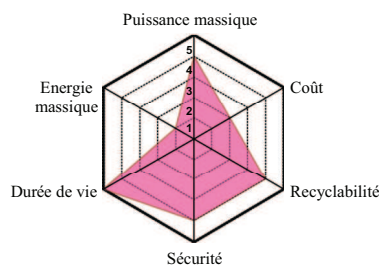
Tableau 1-1. Répartition des 5 niveaux suivant les critères de comparaison [BEN AHMED 05], [MOYSAN 05]

Indices de performances	Durée de vie (nombre de cycles)	Energie massique (Wh/kg)	Puissance massique (W/kg)	Coût (€/kWh)	Recyclabilité (%)	Sécurité
Indice 1	10-10 ²	5-10	50-100	>10 ⁶	0-20	1
Indice 2	10 ² -10 ³	10-50	100-500	10 ⁵ -10 ⁶	20-40	2
Indice 3	10 ³ -10 ⁴	50-100	500-1000	10 ⁴ -10 ⁵	40-60	3
Indice 4	10 ⁴ -10 ⁵	100-500	1000-5000	10 ³ -10 ⁴	60-80	4
Indice 5	>10 ⁵	500-1000	> 5000	10 ² -10 ³	80-100	5

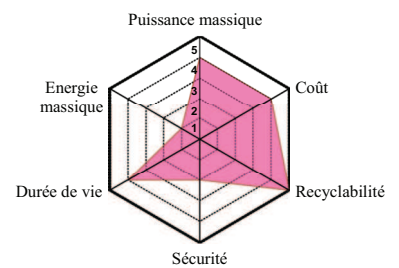
Batteries



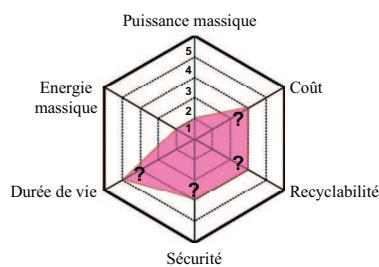
Supercondensateurs



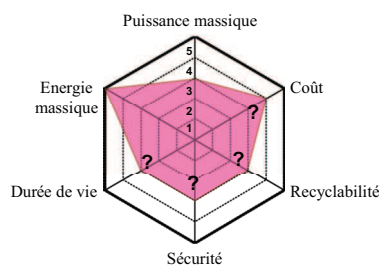
Système volant d'inertie



Système Air comprimé



Système PAC



Inductances supraconductrices

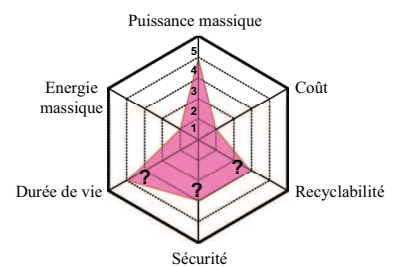


Figure 1-16. Comparaison des différents SSE électrique

Les supercondensateurs, les volants d'inertie et les inductances supraconductrices sont les meilleurs candidats pour des applications nécessitant de fortes contraintes en puissance, et où le nombre de cycles charge / décharge est important. Cependant ces SSE électriques présentent une faible énergie massique (niveau 1) et donc une faible autonomie. En termes de prix, les inductances supraconductrices semblent actuellement les moins adaptées pour une application véhicule. En terme de recyclabilité, les systèmes volant d'inertie et à air comprimé sont les plus intéressants car le système ne comporte pas de produits chimiques, cependant la sécurité de fonctionnement des volants d'inertie reste à garantir (Figure 1-16).

1.1.4.2. Vers l'utilisation du stockage mixte de l'énergie électrique

A la vue de la Figure 1-16, il apparaît qu'aucun des SSE électriques n'atteint l'indice de performance 5 pour l'ensemble des critères considérés. En effet, la plupart des SSE électriques excellent dans un ou deux critères et sont moins bons voire mauvais dans les autres. Aussi, la question suivante se pose : comment obtenir un SSE électrique le mieux adapté à une application véhicule du futur ?

La première idée a déjà été évoquée précédemment pour le transport guidé électrique. Elle consiste à associer soit un SSE électrique à un réseau de véhicules alimentés par caténaire ou rail d'alimentation. Le ou les SSE électriques sont choisis de façon à être complémentaires aux caractéristiques de l'alimentation par caténaire ou rail. Des exemples de véhicules guidés alimentés par (caténaire / système volant d'inertie), (caténaire / supercondensateurs), (caténaire / batteries) ont été présentés au paragraphe 1.1.3.2.

La deuxième idée, adaptée aux applications à l'énergie électrique embarquée, consiste à associer deux SSE électriques. Ceux-ci sont également choisis de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. Cette association permettrait de pallier les lacunes de chaque SSE pris séparément et d'allier leurs avantages respectifs. Au global le SSE électrique mixte devrait présenter un bon compromis sur l'ensemble des critères considérés. Différentes associations sont envisageables pour obtenir un SSE électrique mixte présentant les meilleurs atouts pour une application véhicule : (batteries / supercondensateurs), (batterie / système volant d'inertie), (système PAC / supercondensateurs), (système PAC / système volant d'inertie).

1.1.4.3. Association batteries / supercondensateurs

Depuis quelques années, des recherches sont en cours sur l'association batteries / supercondensateurs car c'est celle qui semble la moins complexe à mettre en place. Elle permet d'obtenir un SSE électrique ayant une forte densité de puissance et une forte densité d'énergie : les supercondensateurs répondent aux besoins en puissance et la batterie à ceux en énergie. Elle permettrait également d'augmenter la durée de vie, et de diminuer la taille et donc le poids des batteries (Figure 1-7) [EH-SANI 05] [AYAD 04]. Un prototype de VE électrique mixte (batteries / supercondensateurs), appelé la B^o a été présenté au salon de l'automobile de Paris 2008, par le groupe Bolloré (Figure 1-8).

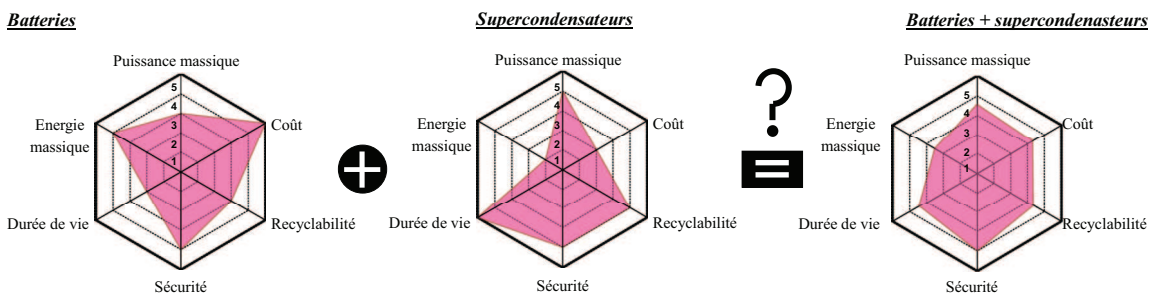


Figure 1-17. Association batteries / supercondensateurs



(a) Prototype



(b) Batteries lithium-métal-polymère



(c) Supercondensateurs

Figure 1-18. La B^o de Bolloré

Nous verrons tout au long de ce mémoire d'autres exemple de véhicule mixte utilisant l'association batteries / supercondensateurs.

1.2. Association de sources électriques

L'objectif de cette partie est de présenter les différentes architectures d'associations de sources électriques ainsi que les modèles des sources de stockage d'énergie électrique utilisés par la suite.

1.2.1. Architecture d'association de sources électriques

Il existe différentes possibilités d'associer des sources électriques : association passive, active avec un ou deux convertisseurs.

❖ Architectures sans association

Pour un VE routier, l'architecture de base sans association de sources est constituée d'une unique source de stockage électrique, généralement constituée de batteries et est directement connectée au système de traction (Figure 1-19.a). Celui-ci est généralement constitué d'un ou plusieurs onduleurs reliés à une ou plusieurs machines électriques (Figure 1-20). Or pour minimiser les pertes (directement liées au courant), il est intéressant d'avoir, en entrée du système de traction, une tension la plus élevée possible. Si on veut connecter directement le SSE au système de traction, il faut donc connecter un nombre suffisant de batteries en série pour atteindre la tension souhaitée, avec les problèmes d'équilibrage que cela engendre. De plus, il peut être intéressant de garder un SSE électrique mixte basse tension qui peut éventuellement servir pour alimenter les auxiliaires du véhicule. Autre inconvénient d'une connexion directe, la tension d'entrée du système de traction varie entre les limites inférieures et supérieures de la tension de la batterie (de l'ordre de 30 à 40% de la tension maximale de la batterie). Il faut donc dimensionner la batterie de manière à ce que, lorsque la tension d'entrée du système de traction est égale à la tension minimale des batteries, les performances de la machine électrique ne soient pas dégradées.

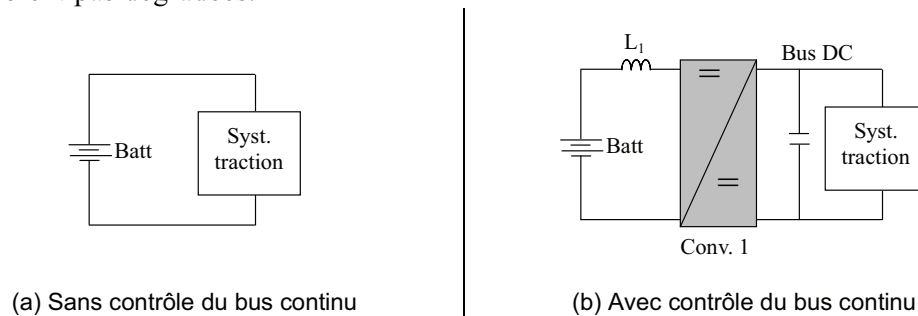


Figure 1-19. Architectures sans association d'un VE routier

Une solution consiste à rajouter une inductance et un convertisseur afin d'augmenter la tension d'entrée du système de traction. Cette solution introduit un degré de liberté dans le système utilisé pour contrôler la tension du bus continu alimentant le système de traction et la maintenir constante (Figure 1-19.b). On retrouve le même type d'architecture pour un VE guidé sans association de sources où l'unique source électrique est généralement une caténaire directement connectée au système de traction (Figure 1-21).

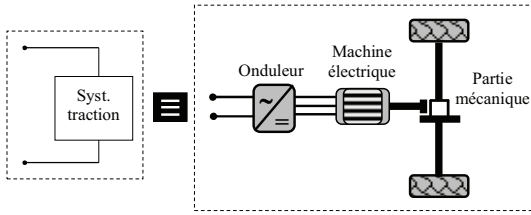


Figure 1-20. Constitution du système de traction d'un VE

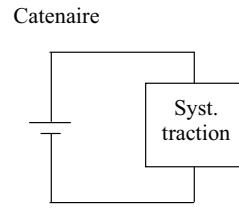


Figure 1-21. Architectures de génération mixte sans association d'un VE guidé

❖ Architectures avec association passive

L'association passive consiste à connecter directement en parallèle les deux sources de stockage d'énergie électrique (Figure 1-22.a).

Considérons un VE routier mixte batteries / supercondensateurs. Le courant de traction se partage entre les batteries et les supercondensateurs et permet ainsi de réduire les contraintes en courant des batteries et d'augmenter sa durée de vie. De plus comme les batteries fournissent moins de courant, elles produisent moins de pertes et présentent un meilleur rendement qu'un SSE électrique uniquement constitué de batterie. Autre avantage, l'ajout de supercondensateurs permet d'augmenter la densité de puissance du SSE électrique. Il existe également des associations passives, avec contrôle du bus continu, qui utilisent un convertisseur statique en sortie de la connexion parallèle (Figure 1-22.b).

Cependant, ces architectures présentent un grand nombre d'inconvénients. La mise en parallèle des sources électriques les oblige à avoir une tension identique. La distribution de courant entre les batteries et les supercondensateurs est déterminée par les résistances et les tensions internes des deux sources. Elle n'est donc pas contrôlable et ne permet pas une répartition optimale de la puissance de traction entre les deux sources [DOUGAL 02], [GAO 03], [PAY 03], [LUKIC 06].

Cette association trouve notamment un fort intérêt pour alimenter les démarreurs de voiture. Le rôle du démarreur est d'entraîner le moteur thermique à une vitesse de rotation suffisante pour lui permettre un fonctionnement autonome. Classiquement, l'alimentation d'un démarreur se fait au moyen d'une batterie Pb 12V pour les véhicules légers et 24V pour les véhicules lourds. Or quand la batterie est utilisée à très basse température, il est souvent difficile de démarrer le moteur thermique car le couple fourni par le démarreur est trop faible.

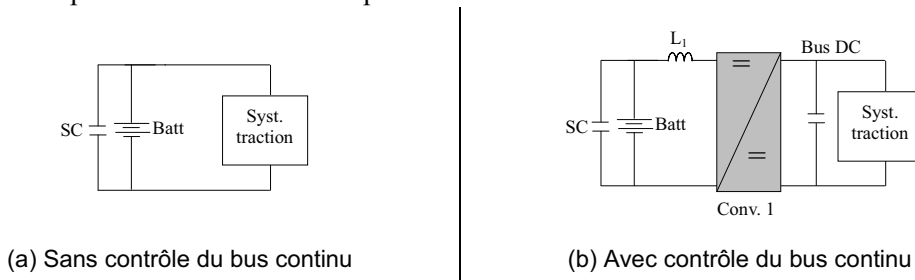


Figure 1-22. Architectures de stockage mixte avec association passive

L'association passive permettrait de remédier à ce problème et ainsi d'améliorer la fiabilité du véhicule [WATERLAIN 06] [RIZOUG 09] [LIU 10].

Des travaux ont également été menés sur l'association passive système PAC et supercondensateurs [WU 06] [GARCIA 07].

❖ Architectures avec association active

L'association active de base consiste à placer un convertisseur (*conv. 1*) entre les deux sources de stockage. Afin de respecter la loi d'association des sources, une inductance (L_1) est également rajoutée (Figure 1-24.a).

Pour un VE routier mixte utilisant une association active batteries / supercondensateurs, l'inductance est généralement placée du côté des supercondensateurs. En effet, la capacité des supercondensateurs a tendance à décroître avec la fréquence et il est donc préférable de les utiliser à basses fréquences [BARRADE 03a].

Généralement, ce sont les batteries qui sont connectées au système de traction car leur tension varie moins que celle des supercondensateurs, qui est directement proportionnelle à leur état de charge. Le convertisseur est généralement un hacheur deux quadrants réversible en courant. Des études ont également été menées sur l'utilisation d'un hacheur entrelacé pour réduire les pertes par commutation et limiter le volume et le poids des éléments passifs [AMJADI 09]. Cette architecture a l'avantage de permettre aux sources de stockage d'avoir des tensions différentes. Le degré de liberté introduit par le convertisseur permet de contrôler les flux de puissance entre la batterie et le banc de supercondensateurs de façon à ce que, par exemple, les batteries fournissent la puissance moyenne de traction et les supercondensateurs les pics de puissance notamment pendant les phases d'accélération et de décélération [PAY 03], [MILLER 05], [LUKIC 06].

Des travaux ont également été menés sur l'association active système PAC et supercondensateurs sans contrôle du bus continu [GAO 03] [AZIB 09].

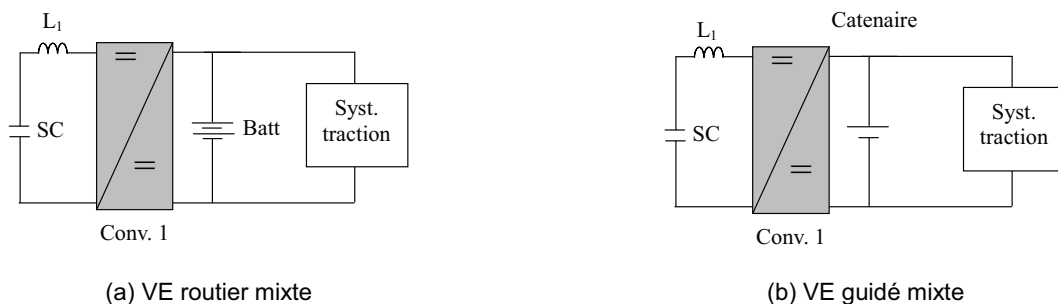


Figure 1-23. Architecture avec association active sans contrôle du bus continu

Il existe aussi des associations actives avec contrôle du bus continu qui utilisent deux convertisseurs statiques (*conv. 1 et 2*) pouvant être mis en parallèle ou en cascade (Figure 1-24.a, b). L'alternance source de courant, source de tension, nécessite l'ajout d'une inductance supplémentaire (L_2). En termes de rendement, l'architecture avec les convertisseurs en parallèle est plus intéressante que celle avec les convertisseurs en cascade. En effet, si par exemple les supercondensateurs assurent à eux seuls la traction du véhicule, pour la première structure, le flux de puissance passe par le convertisseur 1 tandis qu'il est obligé de passer par les convertisseurs 1 et 2 pour la deuxième structure (Figure 1-24.a, b). De plus, les convertisseurs sont dimensionnés en fonction des tensions et courants qu'ils doivent supporter. Ainsi si le flux de puissance entre les supercondensateurs et le système de traction met en œuvre les courants les plus contraignants, la structure avec convertisseurs en parallèle est plus avantageuse en termes de dimensionnement par rapport à la structure avec convertisseurs en cascade pour laquelle les convertisseurs 1 et 2 devront être dimensionnés pour supporter ces courants. Il en est de même pour le dimensionnement des inductances. Autre point, le courant des batteries est lissé dans la structure avec convertisseur en parallèle alors qu'il est haché dans la structure avec convertisseurs en cascade [LUKIC 06].

Les convertisseurs sont généralement deux hacheurs deux quadrants réversibles en courant. Pour la structure parallèle, des études ont également été menées sur l'utilisation de deux hacheurs entrelacés toujours dans le but de réduire les pertes par commutation et de limiter le volume et le poids des éléments passifs [RUFER 99].

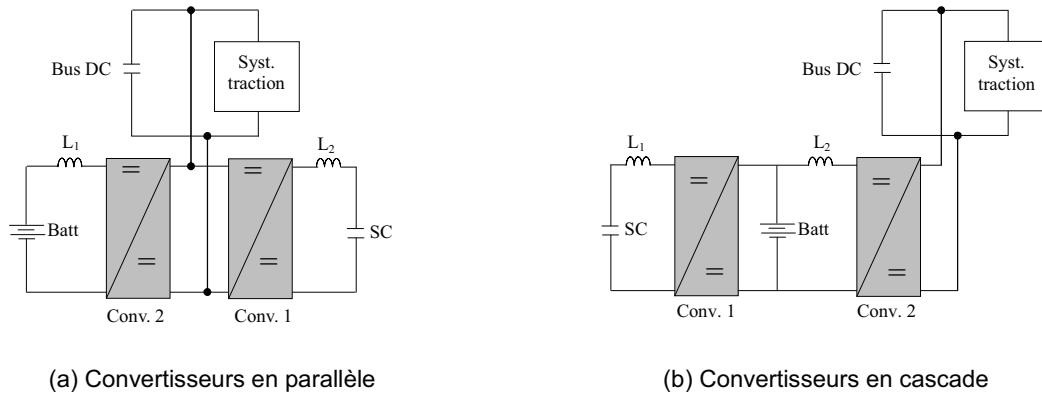


Figure 1-24. Architectures avec association active avec contrôle du bus continu pour un VE routier mixte

Des travaux de recherche sont également effectués sur l'association active, système PAC et supercondensateurs avec contrôle du bus continu, et utilisent la structure avec les convertisseurs en parallèle [PAYMAN 07], [AZIB 09], ou en cascade [PAYMAN 07], [THOUNTHONG 07].

On retrouve les mêmes types d'architecture pour les VEs guidés mixtes avec association active. Supposons par exemple que le véhicule étudié soit alimenté par caténaire et supercondensateurs. Parmi les structures utilisées, on retrouve notamment l'association active sans contrôle du bus continu et l'association active avec contrôle du bus continu, convertisseurs en cascade (Figure 1-25) [DESTRAZ 08].

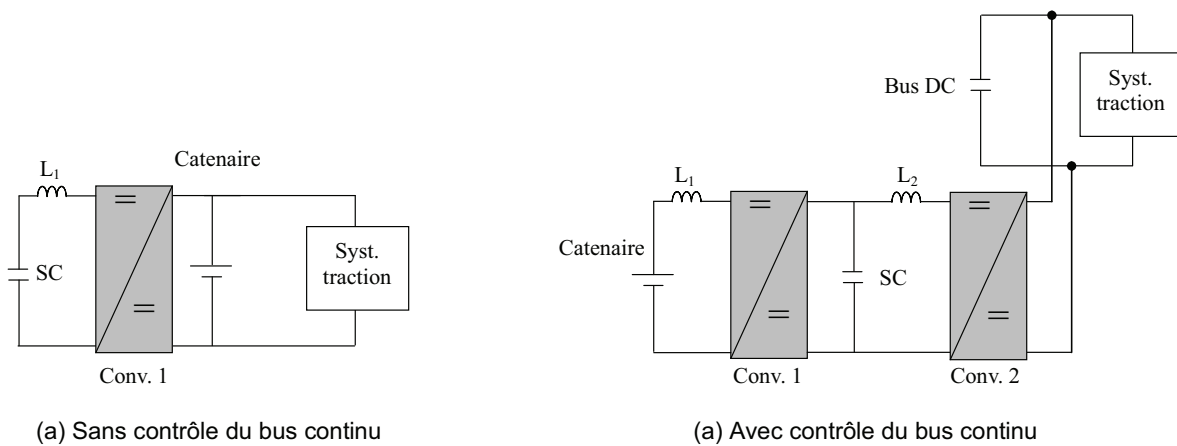


Figure 1-25. Architectures de génération mixte avec association active pour un VE guidé mixte

1.2.2. Modélisation des sources de stockage d'énergie électrique

Les modèles de sources de stockage d'énergie électrique adaptés au stockage mixte vont être développés. Seuls les modèles de supercondensateurs et batteries seront traités ici car les applications traitées par la suite utilisent uniquement ces deux sources de stockage.

1.2.2.1. Vocabulaire d'usage

Pour éviter les confusions, les notions de capacité, état de charge et profondeur de décharge vont être définies pour les batteries et les supercondensateurs.

Quand on parle de la capacité d'une batterie, celle-ci est définie comme la charge totale que peut fournir une batterie après avoir été complètement chargée. Cette capacité d'une batterie $C_{\Delta t}$ est donnée en Ampères heures (Ah). Elle est donnée pour une décharge à courant constant I_{batt} et une température fixée, et est obtenue par l'intégration du courant sur la totalité de la décharge.

$$C_{\Delta t} = I_{batt} \Delta t \quad (1)$$

Où Δt est la durée de la décharge complète, exprimée en heures.

La capacité énergétique d'une batterie est définie comme l'énergie totale que peut fournir une batterie après avoir été complètement chargée et est exprimée en Wh. Généralement on utilise la capacité de la batterie (en Ah) plutôt que la capacité énergétique de la batterie (en Wh).

Quand on parle de la capacité d'un supercondensateur, il est sous entendu que l'on parle de sa **capacité électrique**. Elle est définie comme la quantité de charge électrique pour un potentiel donné. L'énergie totale stockée par un supercondensateur peut être calculée à partir de sa capacité électrique C_{sc} exprimée en Farad (F) et de sa tension maximale U_{sc_max} (2) [ROBERT 04].

$$E_{sc_tot} = \frac{1}{2} C_{sc} U_{sc_max}^2 \quad (2)$$

L'état de charge d'une batterie, en anglais **State Of Charge (SOC)**, est défini comme le rapport entre la capacité résiduelle de la batterie et sa capacité nominale, et est exprimé en pourcentage (3). Il est à 100% quand la batterie est complètement chargée et à 0% quand elle est complètement déchargée. Contrairement à un supercondensateur, le SOC d'une batterie n'est pas proportionnel à sa tension. Ainsi, un SOC = 0% ne signifie pas que la tension aux bornes de la batterie soit nulle.

$$SOC_{batt} (\%) = \frac{C_r}{C_n} 100 \quad (3)$$

Où C_r , et C_n sont respectivement les capacités résiduelle et nominale de la batterie, exprimées en Ah.

L'énergie totale stockée par un supercondensateur s'exprime comme celle d'un condensateur classique (cf. (2)), ainsi, le SOC d'un supercondensateur est proportionnel à sa tension. Il est défini comme le rapport entre sa tension et sa tension maximale, et est généralement exprimé en pourcentage (4). Il est à 100% quand la tension du supercondensateur, u_{sc} , est maximale et à 0% quand la tension u_{sc} est nulle.

$$SOC_{sc} (\%) = \frac{u_{sc}}{U_{sc_max}} 100 \quad (4)$$

La profondeur de décharge d'une batterie, en anglais **Depth Of Discharge (DOD)**, est définie comme le rapport entre la capacité déchargée de la batterie et sa capacité nominale, exprimé en pourcentage (5). Il est généralement exprimé en fonction du SOC de la batterie.

$$DOD_{batt} (\%) = \frac{C_d}{C_n} 100 = 100 - SOC \quad (5)$$

Où C_d est la capacité déchargée de la batterie, exprimée en Ah.

Le DOD d'un supercondensateur est défini comme le rapport entre sa tension maximale et sa tension, exprimé en pourcentage (6). Il faut noter que pour un supercondensateur, on parle d'avantage de taux de décharge en tension que de DOD.

$$DOD_{sc}(\%) = \frac{U_{sc_max}}{u_{sc}} 100 = 100 - SOC_{sc} \tag{6}$$

1.2.2.2. Batteries

Après avoir présenté le principe de fonctionnement d’une batterie, ses caractéristiques et son comportement, différents modèles de batteries utilisant des circuits électriques équivalents vont être développés ainsi que les méthodes utilisées pour identifier leurs paramètres.

1.2.2.2.1. Généralités

❖ Principe de fonctionnement

Une batterie est constituée de plusieurs accumulateurs mis en série. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, une positive et une négative, plongées dans un électrolyte. Chaque électrode met en jeu un couple d’oxydoréduction. Un accumulateur est une « pile réversible » qui peut fonctionner aussi bien en générateur qu’en récepteur (Figure 1-26) [ROBERT 04].

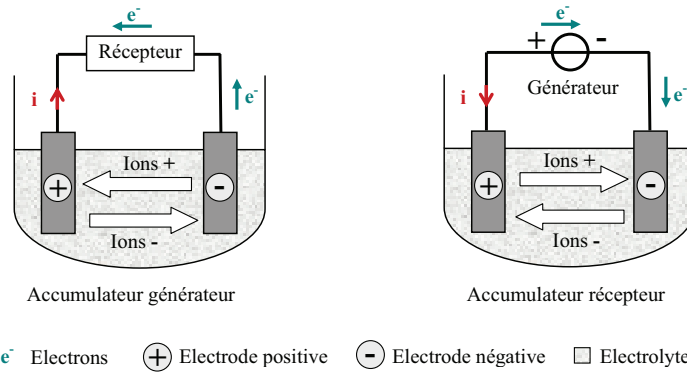


Figure 1-26. Accumulateur en fonctionnement générateur et récepteur

Lorsqu’il fonctionne en générateur, il convertit l’énergie chimique de réactions d’oxydoréduction, en énergie électrique. Pour qu’un courant puisse prendre naissance, il est nécessaire que les ions et les électrons puissent circuler : l’électrolyte assure la conduction ionique et un circuit extérieur reliant les deux électrodes via un récepteur (une résistance par exemple) assure la conduction électronique. Le sens du courant est imposé par les transformations chimiques spontanées, l’accumulateur se décharge.

Lorsqu’il fonctionne en récepteur, un accumulateur convertit cette fois l’énergie électrique en énergie chimique. Le sens du courant est inverse au précédent et est imposé par le générateur branché à ses bornes, l’accumulateur se charge.

❖ Propriétés principales

Energie – Parmi les moyens de stockage d’énergie électrique présentés précédemment, les batteries se démarquent par une énergie massique importante, pouvant atteindre jusqu’à 200 Wh/kg pour les batteries lithium-ion (Table 1-2)) [HUSAIN 03].

Puissance – Dans les batteries, l’électricité est stockée sous forme d’énergie électrochimique. Ainsi, la cinétique des réactions électrochimiques empêche les batteries de se charger et se décharger rapidement. Leur puissance massique, pouvant atteindre jusqu’à 2kW/kg pour les batteries lithium-ion (Table 1-2).

Cyclabilité – Le principal inconvénient des batteries est qu’elles supportent mal le cyclage qui réduit sensiblement leur durée de vie. En effet, au fil des cycles charge / décharge, des phénomènes de

vieillessement apparaissent (détérioration des matériaux, de la structure...) et la quantité d'énergie que peut stocker ou restituer les batteries décroît.

❖ *Comportement en tension*

Tension à vide et en charge - Les réactions d'oxydoréduction au niveau des électrodes sont à l'origine d'une force électromotrice (fem). Lorsque la batterie débite du courant, la tension à ses bornes n'est plus égale à celle à vide. Des phénomènes statiques et dynamiques interviennent et sont à l'origine de ces différences de tension et sont appelées « surtensions » (Figure 1-28), [CAUMONT 97], [KHUN 02], [MATAGNE 04], [FORGEZ 09].

Tableau 1-2. Propriétés des batteries pour une application véhicule [HUSAIN 03]

Technologie	Energie massique (Wh /kg)	Puissance massique (W/kg)	Nombre de cycles	Rendement (%)	Coût estimé (euros / kWh)
Plomb	35-50	150-400	500-1000	80	64-95
Nickel-cadium	30-50	100-150	1000-2000	75	250-350
Nickel-hydrure de metal	60-80	200-300	1000-2000	70	200-350
Lithium-ion	80-200	200-300	1000	> 95	500-1500

Surtensions ohmiques - Elles se produisent essentiellement dans l'électrolyte qui possède une certaine résistance interne liée à la conductivité de l'électrolyte. Ces surtensions ohmiques sont généralement modélisées par une résistance R_1 . Lorsque plusieurs batteries sont mises en série, il faut également considérer les résistances liées aux connectiques.

Surtensions de polarisation - Lorsque l'on applique une différence de potentiel électrique aux électrodes plongées dans un électrolyte, chaque surface d'électrode se comporte comme un condensateur : des électrons viennent s'accumuler sur l'une des deux surfaces électrode / électrolyte et des trous (absence d'électrons) sur l'autre. En raison de la conduction ionique de l'électrolyte et sous l'effet du champ électrique créé, la couche immédiatement adjacente à chaque électrode acquiert une charge opposée, on parle de formation de « double couche électrochimique ». Il apparaît alors un courant momentané qui s'annule rapidement, ce qui revient à dire que l'électrode est polarisée. Ces surtensions de polarisation sont généralement modélisées par un condensateur C_2 .

Surtensions de transfert de charge - Ces surtensions apparaissent aux interfaces électrodes / électrolyte lorsque les électrodes libèrent ou gagnent des électrons. Elles sont généralement modélisées par une résistance R_2 .

Surtensions de diffusion - Lors du passage d'un courant, le déplacement des espèces provoquent une inhomogénéité de concentration entre le milieu de l'électrolyte et les surface électrolyte / électrodes. Sous l'effet de ce gradient chimique, les espèces se déplacent alors en sens inverse à celui-ci, c'est-à-dire des milieux les plus concentrés vers les milieux les moins concentrés afin de rétablir l'homogénéité de concentration, et sont ainsi responsables de ces surtensions de diffusion. Ces dernières sont généralement modélisées par une série de circuits RC parallèles mis en série.

❖ *Dynamiques des surtensions*

Les surtensions ohmiques ont des dynamiques très rapides (100 μ s – 10 ms) et interviennent donc aux **Hautes Fréquences (HF)** (100 Hz – 10 kHz). Les surtensions de transfert de charge et de polarisation ont des dynamiques plus lentes (10 ms – 1 s) et interviennent dans une gamme de fréquence plus basses (1Hz – 100Hz). Les surtensions de diffusion sont quant à elles caractérisées par des dy-

namiques qui peuvent être très lentes (100 ms – 1 jour) et interviennent aux **Basses Fréquences (BF)** (< 1 Hz) (Figure 1-28) [MONTARU 09].

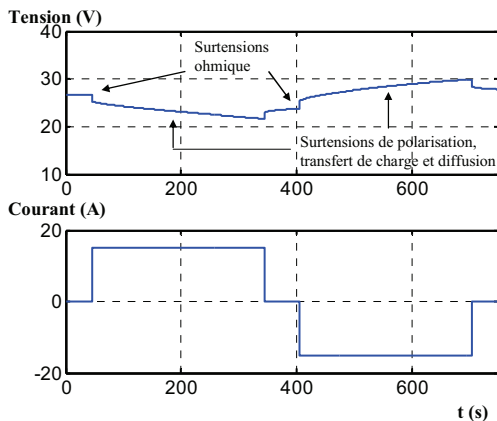


Figure 1-27. Réponse en tension d'une batterie en décharge et en charge

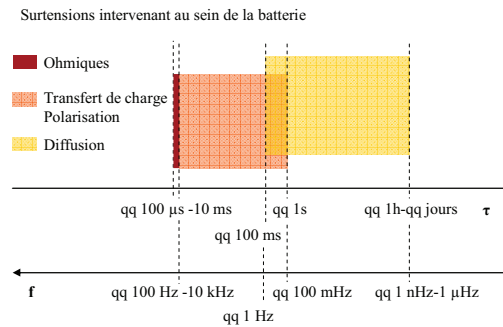


Figure 1-28. Dynamiques des surtensions d'une batterie

1.2.2.2.2. Modélisation

❖ Approche

Il existe plusieurs approches pour modéliser un système électrochimique. Seule la modélisation par circuit électrique équivalent à constantes localisées sera développée car c'est la plus employée notamment dans le domaine du génie électrique [KUHN 02]. Elle s'appuie sur l'analogie entre le domaine de l'électrochimie et celui de l'électricité. Ainsi, les éléments électriques du circuit équivalent permettent de décrire les phénomènes qui interviennent au sein du système.

Le modèle choisi va dépendre de la technologie de batterie et de l'application visée. Il doit être suffisamment proche du comportement réel de la batterie, et en même temps ne doit pas être trop complexe afin d'être intégré facilement dans un modèle de simulation d'un système complet. Pour une application véhicule, les batteries sont sollicitées par à-coups. Cette sollicitation est directement dépendante de l'utilisation du véhicule et de la gestion de l'énergie à son bord. Ainsi il paraît indispensable de modéliser la batterie en tenant compte de ses aspects dynamiques.

❖ Les différents modèles par circuit électrique équivalent

Les modèles par circuits électriques équivalents les plus utilisés pour la simulation dans le domaine temporel vont être détaillés en commençant par le modèle le plus simple [KIM 97], [CHAN 00], [EL KADRI 06], [DURR 06], [KUHN 06], [BOULON 08], [FORGEZ 09]. La convention générateur sera utilisée pour les différents modèles.

Modèle idéal - La batterie est représentée par une source de tension continue idéale qui représente la tension à vide, en anglais **Open Circuit Voltage (OCV)** de la batterie (Figure 1-29. (a)). Ce modèle très simple, et donc facile à mettre en œuvre pour un premier modèle de simulation est cependant très éloigné du comportement physique d'une batterie réelle. En effet, les variations de la tension de la batterie avec le courant dues à son impédance interne ne sont pas considérées. De plus la capacité énergétique de la batterie est supposée infinie, ce qui signifie que la batterie peut fournir de l'énergie sur une durée infinie.

Modèle simple - Ce modèle est constitué de la mise en série d'une source de tension représentant l'OCV et d'une résistance R_i qui représente les surtensions ohmiques (Figure 1-29. (b)). Le principal inconvénient de ce modèle est qu'il ignore les phénomènes dynamiques qui ont lieu au sein de la batterie.

Modèle de Thévenin - Ce modèle est un premier modèle dynamique. Il tient compte des surtensions de transfert de charge par l'ajout d'une résistance R_2 et des surtensions de polarisation par la mise en parallèle d'un condensateur de double couche C_2 (Figure 1-29. (c)).

Modèle de Randles - En plus des surtensions ohmiques, de transfert de charge et de polarisation, ce modèle prend en compte les surtensions de diffusion qui sont modélisées par une impédance, communément appelée impédance de Warburg Z_w . Cette impédance peut être modélisée par une série de n circuits $R'C'$ parallèles afin de décrire les différentes dynamiques du phénomène de diffusion. Ce modèle certes difficile à mettre en œuvre tend à se rapprocher du comportement réel de la batterie.

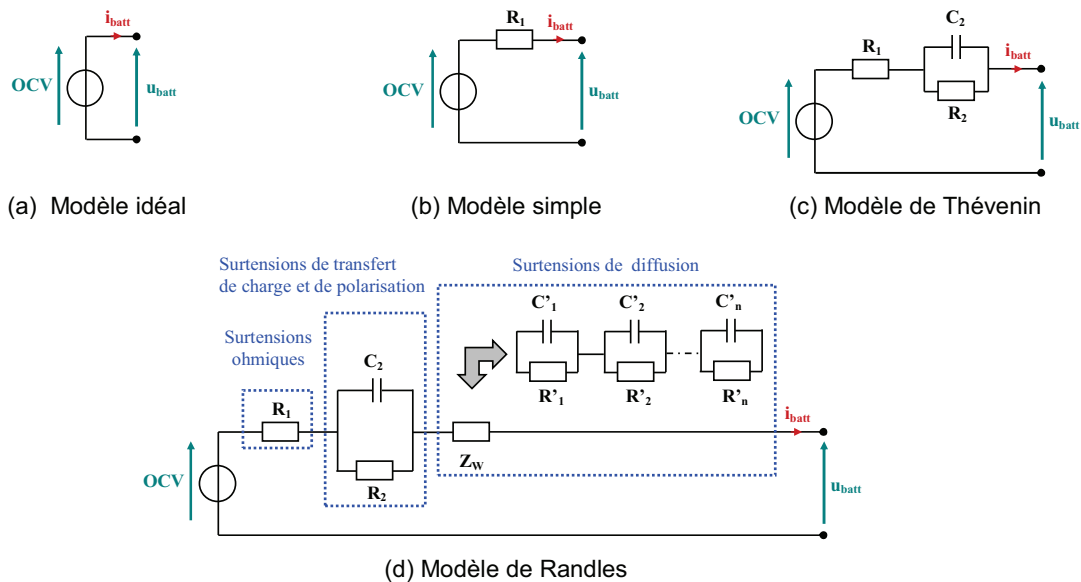


Figure 1-29. Différents modèles de batteries

❖ *Prise en compte des paramètres influents*

Les éléments constituant les différents modèles présentés précédemment varient notamment avec le SOC, la température et le courant de la batterie. L'influence de ces paramètres peut être prise en compte dans les modèles [CAUMONT 97], [CHAN 00].

En particulier, l'OCV d'une batterie varie avec son SOC. Son évolution peut être différente en charge et en décharge et dépendre de son historique d'utilisation. Il apparaît alors dans le plan (SOC, OCV) un hystérésis global obtenu après recharge et décharge complètes effectuées en continu et d'autres hystérésis plus petits, obtenus après succession de charges et décharges partielles [MONTARU 09].

Le rendement faradique qui représente l'efficacité de la recharge varie également avec le SOC, notamment dès que celui-ci devient $> 90\%$ (Figure 1-31).

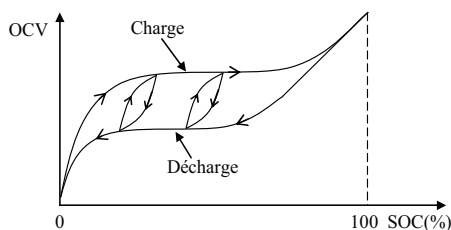


Figure 1-30. Phénomène d'hystérésis

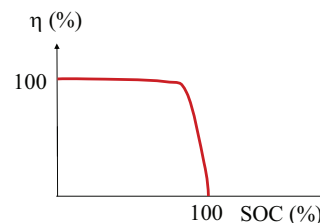


Figure 1-31. Rendement faradique

❖ Détermination du SOC

Il existe différentes méthodes de calcul de l'état de charge d'une batterie, la plus classique est effectuée par coulométrie. En convention générateur, il s'exprime de la façon suivante (7):

$$SOC_{batt}(\%) = SOC_{batt_i}(\%) - \begin{cases} \int \frac{i_{batt}(t) dt}{C_n} \frac{100}{3600}, & \text{en décharge } i_{batt} > 0 \\ \int \frac{i_{batt}(t) \eta dt}{C_n} \frac{100}{3600}, & \text{en charge } i_{batt} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Où SOC_{batt_i} est l'état de charge initial, η le rendement faradique moyen, C_n la capacité de stockage de la batterie en Ah.

Cette méthode présente cependant plusieurs inconvénients. Le premier est que le rendement faradique, pris en compte dans le calcul du SOC, est choisi constant, alors qu'en réalité il varie avec le SOC. Ainsi avec le temps, la valeur calculée du SOC dérive par rapport à celle du SOC réel de la batterie. Le second inconvénient est que la capacité de stockage peut elle-même varier avec le courant, notamment pour les batteries Pb.

Une des solutions généralement utilisée pour recalculer le SOC à sa valeur réelle, est de mettre la batterie au repos et de mesurer son OCV. La caractéristique $OCV = fct(SOC)$ permet à partir de la mesure de l'OCV de remonter jusqu'au SOC et de recalculer le SOC_{batt_i} dans (7). Cependant pour avoir une mesure correcte de l'OCV, il faut que la batterie ait atteint son équilibre thermodynamique et soit donc au repos depuis un certain temps (jusqu'à quelques heures pour certaines batteries Pb) [CAUMONT 97], [DELFOSSÉ 98].

1.2.2.2.3. Identification

La détermination des paramètres du modèle peut s'effectuer grâce à des essais obtenus par chronopotentiométrie, on parlera d'**identification temporelle** (Figure 1-32) ou par spectroscopie d'impédance électrochimique, en anglais **Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)**, on parlera alors d'**identification fréquentielle** (Figure 1-33).

La mesure d'impédance par chronopotentiométrie est obtenue à partir du rapport de $u_{batt}(t) / i_{batt}(t)$. Des échelons de courant longues durées, faibles amplitudes et de plus courtes durées fortes amplitudes sont appliqués à la batterie. Les premiers types d'échelons permettront de caractériser les phénomènes à dynamique lente (surtensions de diffusion) tandis que les seconds types d'échelon permettront de caractériser les phénomènes à dynamiques plus rapides (surtensions ohmiques, de transfert de charge et de polarisation) et de mettre en évidence la non linéarité de certains éléments du modèle notamment avec le courant.

L'identification temporelle consiste à comparer la réponse en tension obtenue par chronopotentiométrie à celle obtenue en sortie du modèle simulé pour un profil de courant donné. La réponse en tension mesurée est corrigée de l'influence de la tension à vide afin de ne prendre en compte que la chute de tension due à l'impédance.

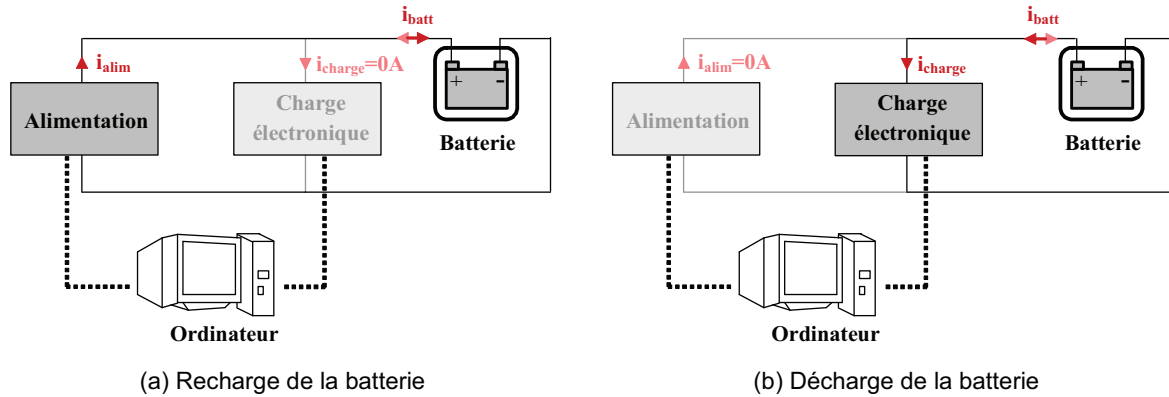


Figure 1-32. Identification temporelle sur batterie

L'inconvénient de cette méthode est que la précision des mesures de tension et de courant et les mesures d'impédance aux hautes fréquences sont généralement limitées par la fréquence d'acquisition du banc d'essai ($< 10 \text{ Hz}$). Il est donc difficile d'identifier les impédances ohmiques, des transferts de charge et de polarisation à partir de la seule identification temporelle [MONTARU 09], [GAUCHIA 09].

La mesure d'impédance par EIS se fait généralement en mode galvanométrique (**GEIS**) : un courant sinusoïdal de fréquence variable i_{batt_ac} (éventuellement superposé à un courant continu i_{batt_dc}) est appliqué à la batterie, la réponse en tension alternative u_{batt_ac} (module et déphasage) est relevée pour toute la gamme de fréquences définie (8) et permet de remonter jusqu'à l'impédance complexe de la batterie (9).

$$\begin{cases} i_{batt_ac}(t) = I_0 \cos(\omega t) \\ u_{batt_ac}(t) = U_0 \cos(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (8)$$

$$Z_{batt}(t) = \frac{u_{batt_ac}(t)}{i_{batt_ac}(t)} = \frac{U_0 \cos(\omega t - \varphi)}{I_0 \cos(\omega t)} = Z_0 \frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\cos(\omega t)} \quad (9)$$

$$\Rightarrow \underline{Z}_{batt} = Z_0 e^{j\varphi}$$

Celle-ci est tracée dans le plan de Nyquist ou Bode et le spectre d'impédance ainsi obtenu permet de visualiser les zones d'influence des différents phénomènes électrochimiques intervenant au sein de la batterie. Le tracé de Nyquist idéal pour le modèle de Randles est donné Figure 1-34 [KHUN 02].

Dans les zones des hautes fréquences (HF), interviennent les surtensions ohmiques, de polarisation et de transfert de charge et dans les zones des basses fréquences (BF), les surtensions de diffusion. Les valeurs des éléments constituant le modèle peuvent être déterminées pour différents SOC.

L'identification fréquentielle consiste à comparer le spectre d'impédance de la batterie obtenue à partir de mesures obtenues par GEIS à celui obtenu à partir du modèle choisi pour la gamme de fréquence définie.

Cette méthode nécessite que l'équilibre thermodynamique du système soit atteint afin d'éviter une dérive en tension de la batterie qui se superposerait au signal « utile ». Elle nécessite également que la réponse du système soit celle d'un système linéaire autour du point de fonctionnement choisi (Figure 1-35).

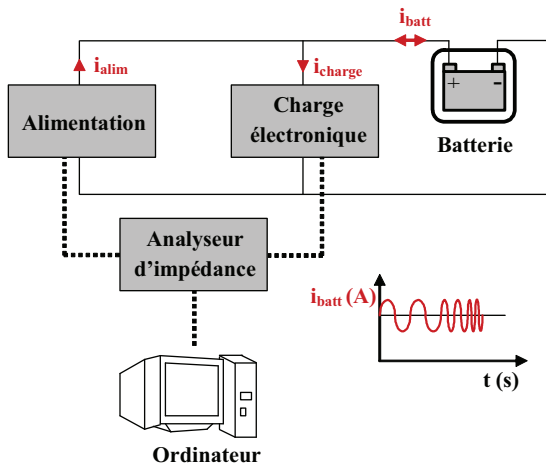


Figure 1-33. Identification fréquentielle

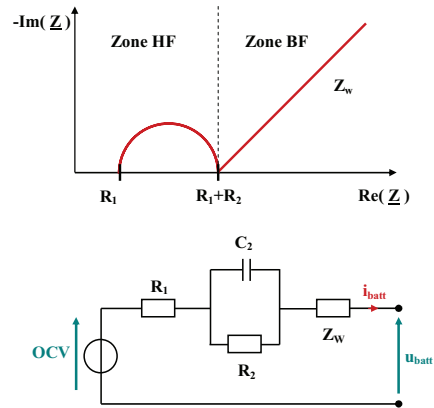


Figure 1-34. Tracé de Nyquist pour le modèle de Randles

Ainsi, les mesures d'impédance ne sont effectuées que pour de faibles valeurs de courant alternatif (quelques centaines de mA) pour ne pas sortir de la zone linéaire. Lorsque les mesures d'impédance sont effectuées avec une composante continue du courant de batterie I_{batt_dc} (donc hors équilibre thermodynamique), celle-ci perturbe la mesure en rajoutant une dérive de la tension et, si cette composant continue est importante, elle induit une variation du SOC au cours de l'essai. Ces dérives en tension et en SOC peuvent être compensées afin de ne pas perturber la mesure d'impédance. Cependant, cette compensation d'autant plus difficile que l'on descend vers les basses fréquences ($< 1\text{mHz}$) car les durées mises en jeu, sont de plus en plus grandes et la dérive en tension de plus en plus importante.

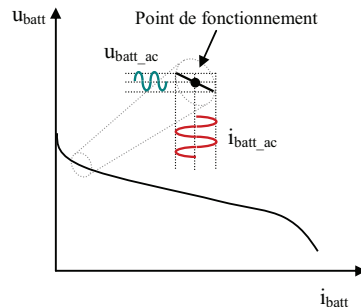


Figure 1-35. Zone de linéarité autour du point de fonctionnement

Ces deux méthodes d'identification peuvent être utilisées de manière complémentaire [MONTARU 08].

1.2.2.3. Supercondensateurs

Après avoir présenté le principe de fonctionnement d'un supercondensateur, ses caractéristiques et son comportement, différents modèles utilisant des circuits électriques équivalents vont être développés ainsi que les méthodes utilisées pour identifier leurs paramètres.

1.2.2.3.1. Généralités

❖ Principe de fonctionnement

Un supercondensateur est constitué de deux électrodes imprégnées d'électrolyte, la présence d'un séparateur permet d'éviter le contact entre les électrodes mais facilite la circulation des ions. Deux collecteurs de courant assurent l'interface entre les électrodes et les connexions. Le principe d'un su-

percondensateur est basé sur le concept fondamental en électrochimie de double couche électrochimique à l'interface entre un conducteur électronique (électrode) et un conducteur ionique (électrolyte) [LASSEGUES 01], [BARRADE 03a].

En charge, lorsqu'un supercondensateur fonctionne en récepteur, une différence de potentiel est appliquée à ses bornes. Les électrons et les trous (absence d'électron) se déplacent dans des directions opposées et viennent s'accumuler aux deux surfaces électrode / électrolyte. Les cations et les anions de l'électrolyte se déplacent dans des directions opposées sous l'effet du champ électrique créé et viennent s'accumuler aux deux surfaces électrolyte / électrode. Il y a formation de deux doubles couches électrochimiques, d'épaisseur de quelques nanomètres dans lesquelles règne un champ électrique relativement intense (Figure 1-36) [AYAD 04].

En décharge, lorsqu'un supercondensateur fonctionne en générateur, les ions de l'électrolyte et les électrons suivent le chemin inverse. Le sens du courant est inverse au précédent (Figure 1-36).

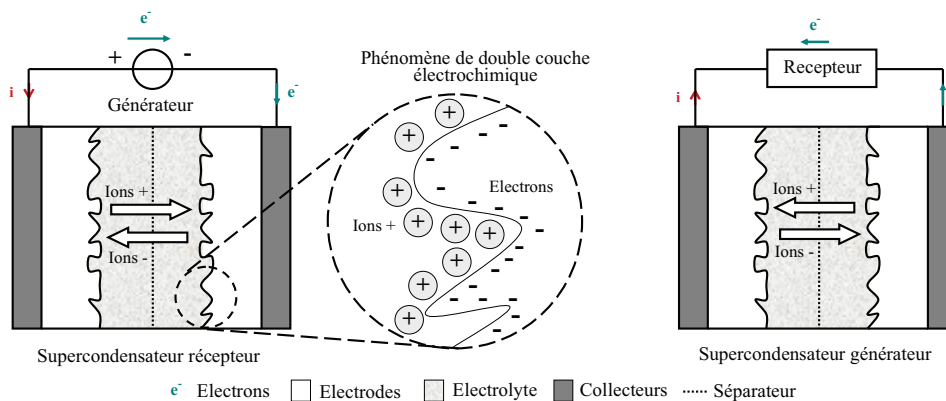


Figure 1-36. Supercondensateur en fonctionnement récepteur et générateur

❖ Propriétés principales

Energie - Elle est proportionnelle à la surface entre électrode / électrolyte. Généralement, les électrodes sont en charbon actif car celui-ci, en plus d'être de faible coût et d'avoir une longue durée de vie, présente une surface spécifique importante. Ainsi, l'énergie stockable est plus importante que celle stockée dans un condensateur classique, [BARRADE 03a], [AYAD 04].

Puissance - Le stockage d'énergie est de type électrostatique et donc, contrairement aux batteries, exempt de réaction électrochimique à l'interface électrodes / électrolyte, ce qui leur confère une puissance massique élevée pouvant aller jusqu'à plusieurs kW/kg.

Cyclabilité - Les supercondensateurs se démarquent également des batteries par leur durée de vie. En effet, ils peuvent supporter plus de 10 000 cycles.

Tenue en tension - La présence de l'électrolyte limite la tension aux bornes d'un supercondensateur, elle est typiquement de 2,7 V quand l'électrolyte est organique. Un supercondensateur s'utilise donc généralement en série afin de travailler sous tension élevée.

Comportement en fréquence - La capacité d'un supercondensateur chute rapidement à mesure que la fréquence augmente. Aussi, pour recharger et décharger un supercondensateur il est préférable de travailler à basses fréquences (Figure 1-37) [RAFIK 06].

❖ Comportement de la tension

Des phénomènes statiques et dynamiques interviennent lors de la décharge et de la recharge d'un supercondensateur (Figure 1-38) [ZUBIETA 98], [RAEL 02].

Surtensions ohmiques - Elles se produisent dans l'électrolyte, dans les électrodes et dans les collecteurs de courant. Ces surtensions ohmiques sont généralement modélisées par une seule résistance, appelée résistance série équivalente R_s .

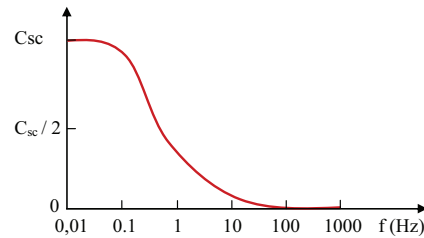


Figure 1-37. Capacité en fonction de la fréquence

Surtensions de polarisation – Comme pour une batterie, elles sont dues aux phénomènes de doubles couches électrochimiques aux interfaces électrodes / électrolyte. Ces surtensions de polarisation sont généralement modélisées par un seul condensateur C_{dc} dont la capacité varie avec la tension appliquée aux bornes du supercondensateur.

Surtensions de relaxation - Elles se produisent alors que le supercondensateur n'est pas sollicité (courant nul). Elles sont dues à une redistribution interne de la charge électrique stockée et sont associées à des constantes de temps généralement très longues. L'existence de pores moins accessibles peut justifier ce phénomène. Ces surtensions de relaxation sont généralement modélisées par une série de circuits RC mis en parallèle ayant des constantes de temps différentes

Surtensions d'autodécharge - Le supercondensateur au repos (c'est à dire sans opération de décharge) est soumis à des phénomènes d'autodécharge. Ces surtensions d'autodécharge sont généralement modélisées par une résistance R_{ad} .

❖ *Dynamiques des surtensions*

Les surtensions ohmiques ont des dynamiques très rapides ($100\mu s$ - 10 ms) et interviennent donc aux HF (100 Hz – 10 kHz). Les surtensions de polarisation ont des dynamiques plus lentes (10 ms – 1 min) et interviennent dans une gamme de fréquence plus basse (100 Hz - 1 mHz). Les surtensions de relaxation sont quant à elles caractérisées par des dynamiques qui peuvent être très lentes (1 min – 1 jour) et interviennent aux BF ($<$ mHz) (Figure 1-39).

1.2.2.3.2. *Modélisation*

Comme pour les batteries, seule la modélisation par circuit électrique équivalent à constantes localisées sera développée. Les modèles les plus utilisés vont être détaillés en commençant par le modèle le plus simple.

Modèle constructeur RC - Ce modèle est composé d'une résistance série R_s , caractérisant les surtensions ohmiques, mise en série avec un condensateur C_{dc} représentant le phénomène de double couche électrochimique.

Ce modèle est souvent utilisé par les industriels car sa mise en œuvre et l'identification de ses paramètres sont simples. Cependant, il ne prend pas en compte la variation de la capacité avec la tension ni les phénomènes de relaxation et d'autodécharge (Figure 1-40.a) [RIZOUG 06].

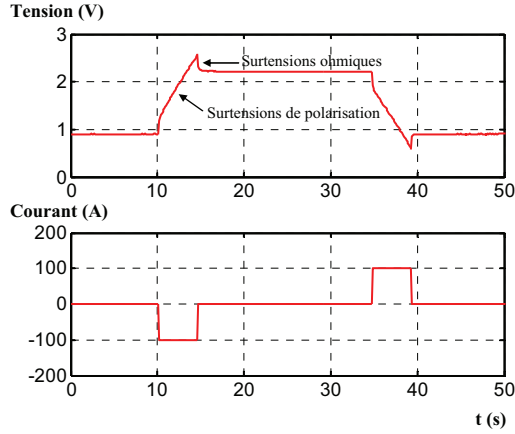


Figure 1-38. Réponse en tension d'un supercondensateur en charge et en décharge

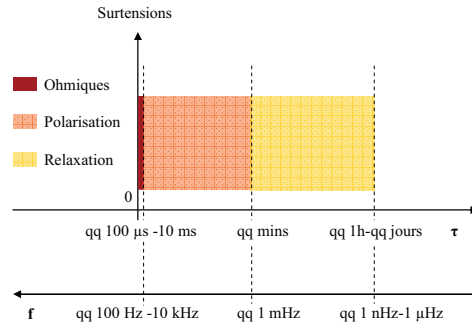


Figure 1-39. Dynamiques des surtections d'un supercondensateur

Modèle à capacité variable - Le phénomène de double couche est caractérisé par un condensateur C_0 dont la capacité est constante, et par un condensateur $C_v(t) = K_v u(t)$ dont la capacité varie linéairement avec la tension instantanée $u(t)$ mesurée aux bornes du supercondensateur. Ce modèle est suffisant pour des courants de charge et décharge de fréquences élevées, pour lesquelles le phénomène de relaxation intervient peu (Figure 1-40.b).

Modèle à 3 branches - La première branche RC prend en compte les phénomènes intervenant durant les phases de charge / décharge (de 0 à 1 min), les autres branches prennent en compte le phénomène de relaxation durant la phase de repos (de 1 à 10 min pour la 2^{ème} branche, > 10 min pour la 3^{ème} branche) (Figure 1-40.c). Le phénomène d'autodécharge est également pris en compte par une résistance mise en parallèle R_{ad} .

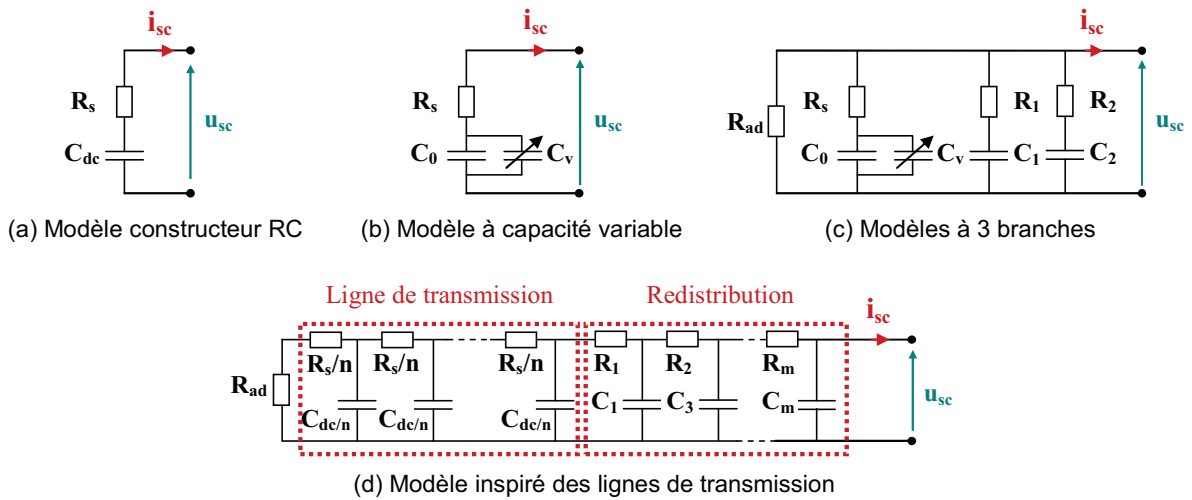


Figure 1-40. Différents modèles de supercondensateur

Ce modèle est plus complexe à mettre en œuvre et l'identification de ses paramètres est plus difficile. On trouve également le même modèle avec un nombre plus important de circuits RC afin de mieux appréhender le phénomène de relaxation [ZUBIETA 98], [FARANDA 07], [BELHACHEMI 01].

Modèle inspiré des lignes de transmissions - Ce modèle permet d'améliorer la précision du modèle précédent. Le circuit RC de la branche principale est remplacé par le modèle d'une ligne de

transmission discrétisée en n cellules identiques. Pour décrire plus finement le phénomène de relaxation, m circuits RC sont mis en parallèle (Figure 1-40.d) [BELHACHEMI 04], [RIZOUG 06].

1.2.2.3.3. Identification

Tout comme les batteries, la détermination des paramètres du modèle de supercondensateur peut s'effectuer à partir d'essais temporels ou fréquentiels.

Le modèle constructeur RC et à capacité variable sont généralement identifiés à partir d'essais temporels en appliquant au supercondensateur un échelon de courant. La résistance R_s est facilement déterminée à partir de la chute de tension quand on applique l'échelon de courant. Les capacités C_{dc} et C_o peuvent être obtenues à partir de la pente initiale de la tension immédiatement après la chute de tension et C_v à partir de la réponse en tension et de la charge totale stockée.

Les modèles à 3 branches et inspiré des lignes de transmissions sont généralement identifiés à partir d'essais temporels et fréquentiels [BELHACHEMI 04], [RIZOUG 06].

1.3. Conclusions

Face aux problèmes liés aux transports routiers et guidés tout thermiques, et aux transports guidés tout électriques, un cahier des charges a été établi pour les transports du futur. Différentes solutions alternatives visant à répondre à ce cahier des charges ont été exposées.

Les solutions Véhicules Electriques (VEs) et Véhicules Electriques Hybrides (VEHs) nécessitent de stocker à bord du véhicule de l'énergie électrique. Pour les véhicules existants sur le marché automobile, le stockage se fait principalement par batteries et pose un certain nombre de problèmes : autonomie, durée de vie, temps de recharge... Un moyen pour répondre à ces problématiques consiste à associer deux sources d'énergie électrique, choisies de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. Nous avons qualifié de véhicule mixte, le type de véhicule qui utilise cette solution. Parmi les associations de sources d'énergie électrique possibles, l'association batteries / supercondensateurs semble un bon compromis concernant les critères d'énergie, puissance, cyclabilité, sécurité, recyclabilité et paraît viable pour une application véhicule.

Dans un véhicule mixte, les deux sources d'énergie électrique peuvent être associées de manières passives ou actives. Chaque architecture d'association a ses avantages, ses inconvénients et ses applications propres. Dans les véhicules étudiés dans les chapitre suivants, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'association actives supercondensateurs / batteries; les modèles de ces deux Systèmes de Stockage d'Energie (SSE) électriques. Les méthodes d'identification les plus utilisées ont été présentées. L'objectif de la thèse vise à proposer une méthodologie d'étude des associations de SSE électriques pour VEs et VEHs de façon en déduire des règles de modélisation, de commande et de dimensionnement.

2

Méthodologie de Modélisation de VEs et de VEHS mixtes

L'objectif de ce chapitre consiste à développer une méthodologie de modélisation de VEs et de VEHs mixtes. Au départ, l'étude porte sur les VEs mixtes à trois sources électriques. La méthodologie développée va permettre de retrouver l'ensemble des architectures et des modèles de ce type de véhicule, et en particulier les architectures les plus courantes qui ont été présentées au chapitre précédent et leurs modèles. La méthodologie est ensuite étendue aux véhicules à quatre sources électriques.

2.1. VEs mixtes à 3 sources électriques

L'objectif de cette partie est de développer une méthodologie de modélisation valable pour la plupart des architectures de VEs mixtes. Cette méthodologie sera appliquée en particulier sur deux VEs mixtes, ayant des architectures différentes : une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte.

2.1.1. Approche

De façon générale, dans un VE mixte, la traction du véhicule est assurée par deux sources de nature électrique. De plus, le système de traction peut également être modélisé par une source électrique équivalente (cf. § suivant). Ainsi un VE mixte se ramène à un système composé de 3 sources électriques.

Il existe de nombreuses architectures d'association de ces sources, les principales ont été présentées au chapitre 1. Une architecture générale, capable de décrire l'ensemble des architectures de VEs mixtes à 3 sources va être construite (Figure 2-1). Cette architecture générale va ensuite être modélisée en utilisant l'outil graphique **REM (Représentation Energétique macroscopique)** [BOUS-CAYROL 03] (voir Annexe C).

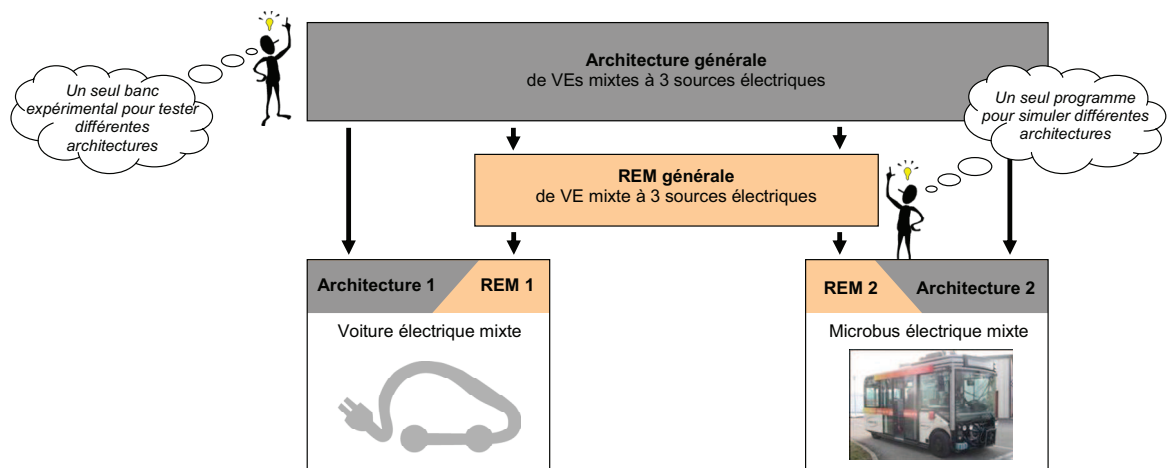


Figure 2-1. Approche de la méthodologie

L'intérêt de cette généralisation est double. En effet, avoir une REM générale va permettre d'avoir une analyse globale du système et de pouvoir simuler l'ensemble des architectures avec un seul et même programme. D'autre part, avoir une architecture générale peut s'avérer intéressante pour tester différentes stratégies sur un même banc expérimental.

La méthodologie développée va être appliquée à deux véhicules électriques mixtes à 3 sources électriques qui ont des architectures différentes, une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte. L'architecture de chacun de ces véhicules est retrouvée à partir de l'architecture générale. De la même manière, la REM de chacun de ces véhicules est retrouvée à partir la REM générale (cf. Figure 2-1).

2.1.2. Construction d'une architecture générale

Après avoir posé le cadre de l'étude, l'ensemble des architectures possibles d'un VE mixte avec et sans bus continu contrôlé va être détaillé. En fait la volonté d'avoir une tension contrôlée aux bornes du système d'entraînement, ou de laisser cette tension « flotter » va induire des structures différentes. Leur étude va permettre de construire une première architecture générale de VE mixte sans bus continu contrôlé et une seconde architecture générale d'un VE avec bus continu contrôlé. La superposition de ces deux architectures va permettre d'obtenir une architecture générale de VE mixte.

2.1.2.1. Cadre de l'étude

Dans ce cadre, un couplage électrique sera défini comme permettant de relier 3 sources électriques indépendantes en parallèle. Chaque couplage électrique reçoit donc 3 liaisons parallèles de 3 sources indépendantes (directement ou indirectement). Ainsi, pour un VE mixte, composé de 3 sources électriques, il apparaîtra toujours au moins 1 couplage et 3 liaisons.

Pour ne pas surcharger les figures, nous utiliserons une représentation simplifiée de chaque élément d'une architecture de VE mixte. Par exemple, nous représenterons un couplage électrique par un nœud entouré d'un rond orange et chaque liaison parallèle par un trait (Figure 2-2). Nous qualifierons la liaison de directe quand il n'y a pas de convertisseur statique entre la source et le couplage et d'indirecte sinon. De plus, les liaisons parallèles représentées seront toutes des liaisons continues. En effet, généralement les SSEs électriques utilisés produisent une variable continue, c'est le cas en particulier des batteries et des supercondensateurs.

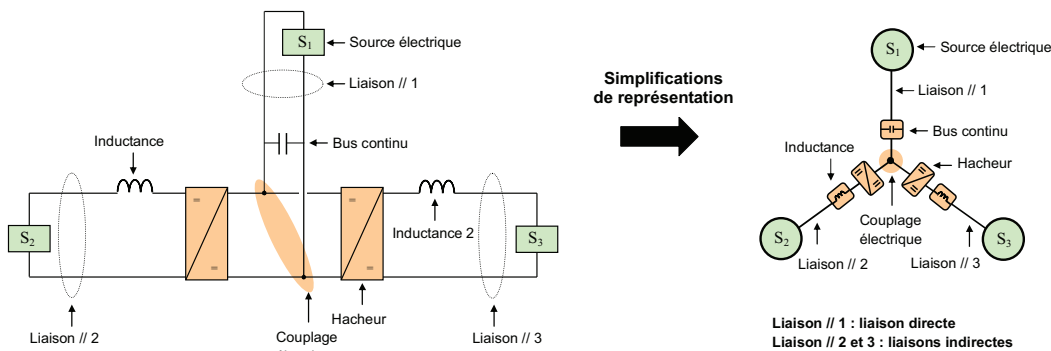


Figure 2-2. Simplification de représentation

Généralement, quand on représente un convertisseur, il est sous entendu qu'on prend en compte le bus continu, étant donné que pour des contraintes technologiques il doit être placé au plus près de celui-ci. Dans cette étude, nous avons choisi de séparer les contraintes technologiques et la représentation des éléments. Ainsi, dans cette étude, la représentation d'un convertisseur ne prendra en compte que ses interrupteurs et sera dissociée de la représentation du bus continu. De plus, lorsque une architecture est représentée, les fils sont supposés idéaux et le bus continu pourra être placé loin du ou des convertisseurs (Figure 2-3). Classiquement, pour un VE routier mixte, la traction est assurée par deux SSEs électriques. Parmi les SSEs électriques utilisés, des batteries, des supercondensateurs et des systèmes PAC sont généralement considérés comme des sources de tension S_T (Figure 2-4).

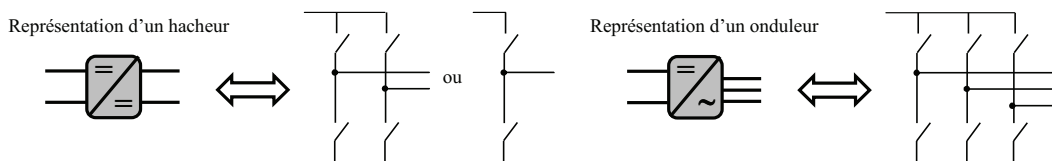


Figure 2-3. Représentation d'un hacheur et d'un onduleur

Les inductances supraconductrices sont généralement considérées comme des sources de courant S_C ainsi que les systèmes volant d'inertie, air comprimée de part la nature des machines électriques qui leur sont associées (Figure 2-5). En sortie de la source électrique équivalente, nous supposons que la connexion électrique est continue, ainsi pour le système volant d'inertie par exemple, la source équivalente englobera le volant d'inertie, une machine électrique ainsi qu'un redresseur de tension. Nous ferons l'hypothèse par la suite que les deux sources de stockage du VE mixte étudié sont des sources de tension, S_{T1} et S_{T2} , ce qui est le cas en particulier pour l'association batteries / supercondensateurs.

Le système de traction d'un véhicule peut également être modélisé par une source de courant S_C de par la nature électrique de sa (ou ses) machine(s) électrique(s).

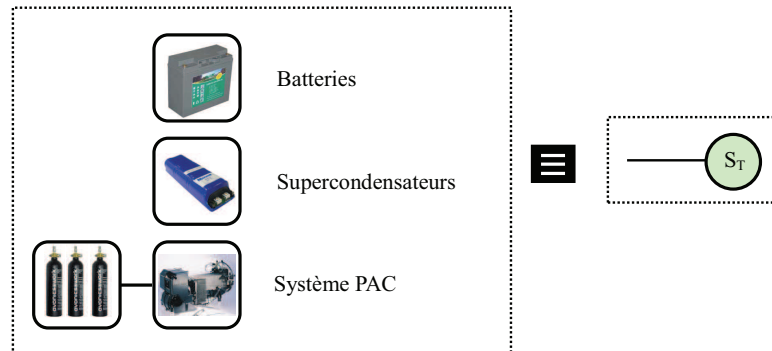


Figure 2-4. SSE électriques considérés comme sources de tension

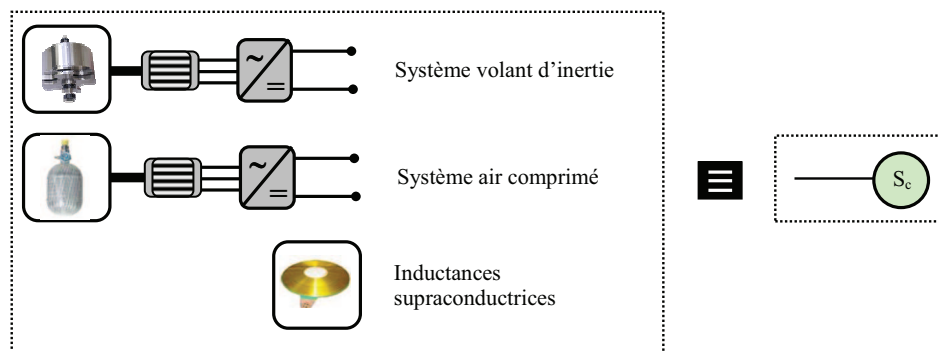


Figure 2-5. SSE électriques considérés comme sources de courant

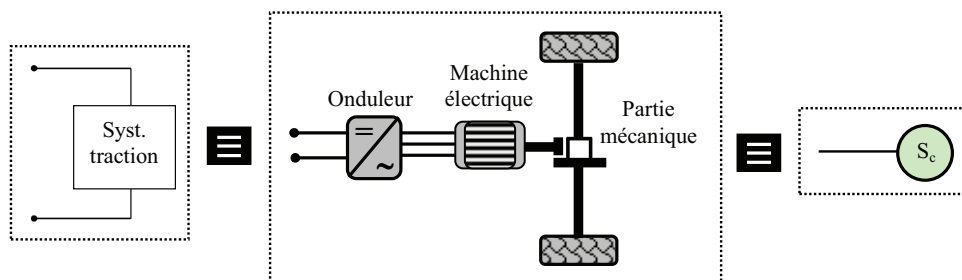


Figure 2-6. Système de traction modélisé par une source de courant

2.1.2.2. Architecture générale d'un VE mixte sans bus continu contrôlé

Dans le VE routier mixte étudié, on ne prend pas en compte dans un premier temps le bus continu connecté au système de traction : on dispose d'une source de courant S_C et deux sources de tensions S_{T1} et S_{T2} . Si on connecte directement les 3 sources en parallèle, d'un point de vue fonctionnel, le système n'est composé que de 2 sources : la source de courant S_C et une seule source de tension équivalente qui regroupe les 2 sources de tension S_{T1} et S_{T2} (Figure 2-7).

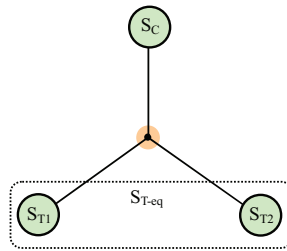


Figure 2-7. Architecture avec 2 sources électriques d'un point de vue fonctionnel

Par la suite, seules les architectures composées de 3 sources électriques distinctes d'un point de vue fonctionnel seront considérées. En effet, l'association directe batteries / supercondensateurs par exemple nécessite certaines précautions lors de la connexion et n'est possible que par le fait que ces sources de tensions ne sont pas parfaites.

Si l'on veut connecter en parallèle 3 sources électriques distinctes d'un point de vue fonctionnel, la seule possibilité est de connecter 1 source de tension à 2 sources de courant. La source de tension impose ainsi sa tension aux deux autres sources.

Dans cette perspective, pour pouvoir connecter ensemble les 3 sources du VE routier mixte étudié, il va donc falloir transformer 1 des 2 sources de tension, S_{T1} ou S_{T2} , en source de courant équivalente (Figure 2-8). Le cas le plus simple consiste à insérer sur la liaison parallèle entre l'une de ces sources et le couplage électrique une inductance de manière à respecter les règles d'association des sources [FOCH 89]. On peut également insérer en plus de l'inductance, un convertisseur statique pour contrôler le flux de puissance entre S_{T1} et S_{T2} .

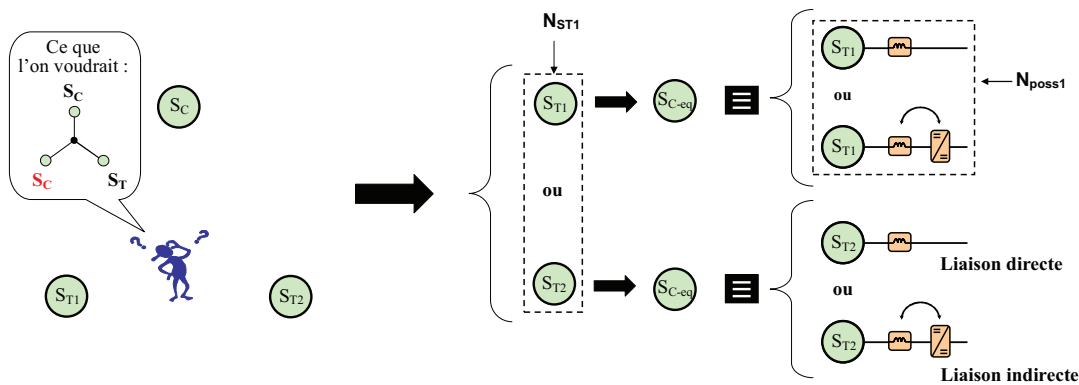


Figure 2-8. Connexion en parallèle de 2 sources de tension et 1 source de courant

Pour traiter tout les cas possibles, on fait l'hypothèse que les sources électriques ne sont pas permutable. De plus, on suppose qu'un convertisseur est nécessairement associé à une inductance qui permet de réduire les effets de hachage du convertisseur.

Pour le système étudié, le nombre total d'architectures envisageables N_{archi1} est le nombre de sources de tensions N_{ST1} , multiplié par le nombre de possibilités N_{poss1} de transformer 1 source de tension en 1 source de courant équivalente (10). Celle-ci peut être réalisée de 2 manières : ajout d'une inductance ou ajout d'une inductance et d'un convertisseur (cf. Figure 2-8).

$$\begin{cases} N_{ST1} = 2 \\ N_{poss1} = 2^1 = 2 \end{cases} \Rightarrow N_{archi1} = N_{ST1} N_{poss1} = 4 \tag{10}$$

On trouve jusqu'à 4 architectures différentes : 2 architectures avec 3 liaisons directes (Figure 2-9.a, b) et 2 architectures avec 2 liaisons directes et 1 liaison indirecte (Figure 2-9.c, d). Les liaisons de la Figure 2-9 sont incurvées de façon à amener l'architecture générale de d'un VE mixte sans bus continu contrôlé.

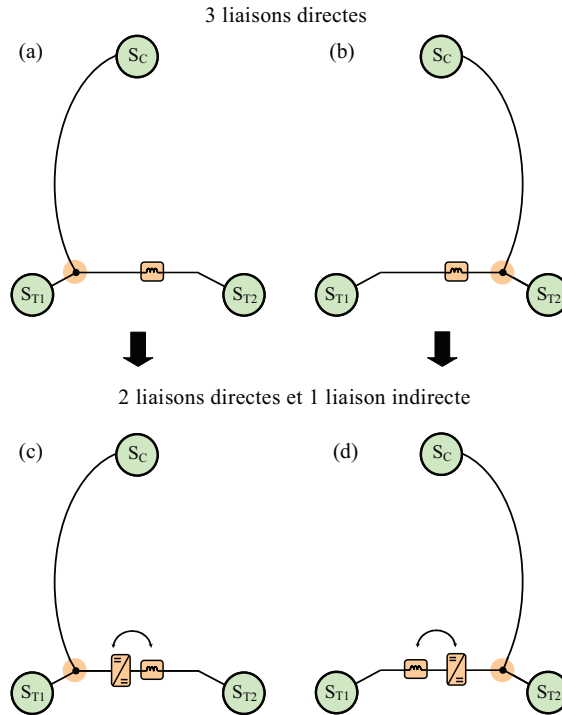


Figure 2-9. Architectures possibles pour un VE mixte sans bus continu

En effet, pour obtenir l'architecture générale d'un VE mixte sans bus continu contrôlé (Figure 2-10), il suffit de superposer l'ensemble des architectures possibles pour ce véhicule (cf. Figure 2-9). A partir de cette architecture pour retrouver chaque architecture particulière, on fait l'hypothèse qu'un convertisseur toujours passant est équivalent à un fil (Figure 2-11). De plus, les interrupteurs K_1 et K_2 ne peuvent pas être passants ou ouverts en même temps. Par exemple, si le convertisseur est toujours passant et l'interrupteur K_1 fermé et l'interrupteur K_2 ouvert, on retrouve l'architecture de la Figure 2-9.a .

2.1.2.3. Architecture générale d'un VE mixte avec bus continu contrôlé

On considère maintenant un VE routier mixte avec bus continu. Le système de traction connecté à ce bus continu constitue une source de tension équivalente S_{T-eq} de part la nature capacitive du bus. Ainsi pour le véhicule étudié, on dispose d'une source de tension équivalente S_{T-eq} et deux sources de tension S_{T1} et S_{T2} . Si l'on transforme la source de tension S_{T-eq} en 1 source de courant équivalente et que l'on connecte directement les 2 sources de tension S_{T1} et S_{T2} en parallèle, d'un point de vue fonctionnel, le système n'est composé que de 2 sources : la source de tension S_{T-eq} et une source de tension équivalente S'_{T-eq} qui regroupe les 2 sources de tension S_{T1} et S_{T2} . Il existe d'autres architectures du même type que nous ne développerons pas ici, les architectures les plus intéressantes étant données Figure 2-12.

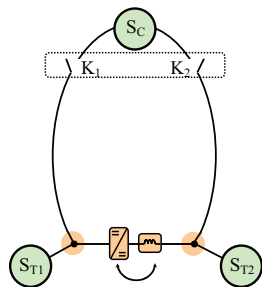


Figure 2-10. Architecture générale pour un VE sans bus

Toujours passant



Figure 2-11. Equivalence d'un convertisseur toujours

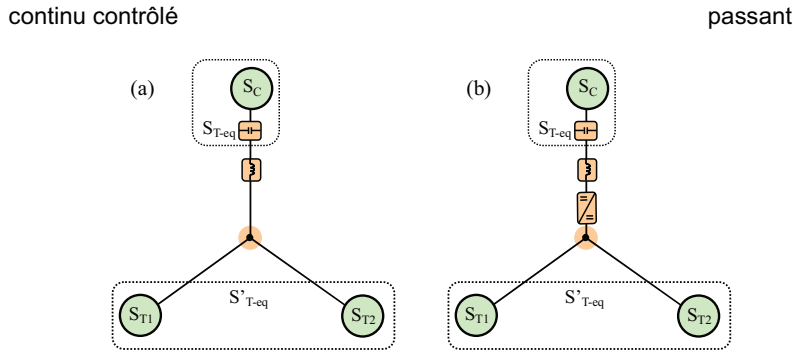


Figure 2-12. Architectures avec 2 sources électriques d'un point de vue fonctionnel

Comme précédemment, seules les architectures composées de 3 sources électriques distinctes d'un point de vue fonctionnel seront considérées. Pour le VE mixte avec bus continu contrôlé, pour pouvoir connecter ensemble ses 3 sources distinctes d'un point de vue fonctionnel, il va donc falloir transformer 2 des 3 sources de tension en 2 sources de courant équivalentes. Les 2 liaisons reliant ces 2 sources au couplage électrique peuvent être directes (insertion d'inductances), indirectes (insertion d'inductances et de convertisseurs) ou l'une directe et l'autre indirecte (Figure 2-13, Annexe B).

Pour le système étudié, le nombre total d'architectures envisageables N_{archi2} est le nombre de sources de tensions N_{ST2} , multiplié par le nombre total de possibilités N_{poss2} de transformer 2 sources de tensions en 2 sources de courant équivalentes, chaque source de courant pouvant être réalisée de 2 façons différentes, (Figure 2-13, Annexe B).

$$\begin{cases} N_{ST2} = 3 \\ N_{ST-SC} = 2, N_{poss2} = 2^{N_{ST-SC2}} = 4 \end{cases} \Rightarrow N_{topo2} = N_{comb2} N_{poss2} = 12 \quad (11)$$

Où N_{ST-SC2} est le nombre de sources de tension à transformer en source de courant équivalente.

On trouve jusqu'à 12 architectures différentes : 3 architectures avec liaisons directes, 6 architectures avec 2 liaisons directes et 1 liaison indirecte et trois architecture avec 1 liaison directe et 2 liaisons indirectes. On peut retrouver l'ensemble de ces architectures en Annexe B.

En effet, pour obtenir l'architecture générale d'un VE mixte avec bus continu contrôlé (Figure 2-14), il suffit de superposer l'ensemble des architectures possibles pour ce véhicule (cf. Figure 2-12 et Annexe B). Il faut également rajouter sur chaque liaison, où se trouvent une inductance et un convertisseur, un interrupteur qui permet d'ouvrir la liaison (Figure 2-14). A partir de cette architecture pour retrouver chaque architecture particulière, on fait l'hypothèse qu'un convertisseur toujours passant est équivalent à un fil (cf. Figure 2-11).

2.1.2.4. Architecture générale d'un VE mixte

Pour obtenir l'architecture générale d'un VE mixte, il suffit de superposer l'architecture générale d'un VE mixte sans bus continu contrôlé à celle d'un VE mixte avec bus continu contrôlé (Figure 2-10, Figure 2-15). A partir de cette architecture générale, en plus de pouvoir retrouver les architectures particulières présentées précédemment, on peut également en déduire une nouvelle structure où les trois convertisseurs sont utilisés. Pour retrouver cette structure, il faut que les interrupteurs K_2, K_4, K_5 et K_6 soient fermés et les interrupteurs K_1, K_3 et K_7 soient ouverts. Cette structure nécessite de nombreux convertisseurs mais elle est possible. L'architecture générale d'un VE nécessite 3 convertisseurs, 4 éléments passifs, parmi lesquels on trouve un condensateur qui assure un bus continu et 3 inductances de lissage, ainsi que 6 interrupteurs, dont trois sont dépendants (K_1, K_2 et K_3). Quelque soit l'architecture obtenue à partir de l'architecture générale, seuls trois couplages ne peuvent être actifs à la fois.

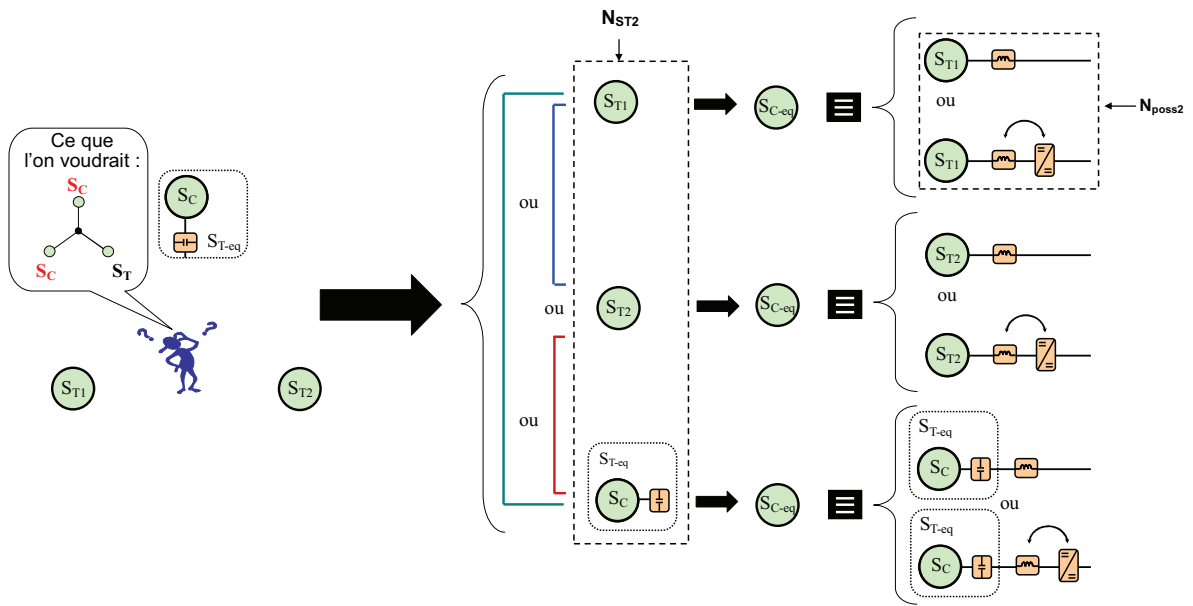


Figure 2-13. Connexion en parallèle de trois sources de tension

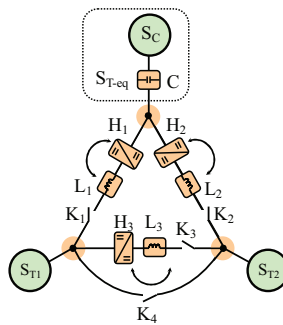


Figure 2-14. Architecture générale pour un VE avec bus continu

Il est important de noter que cette architecture générale peut également être utilisée pour un VE guidé mixte. Classiquement pour ce type de véhicule, la traction est assurée par une caténaire ou un rail d'alimentation, et par une source de stockage d'énergie électrique embarquée ou stationnaire.

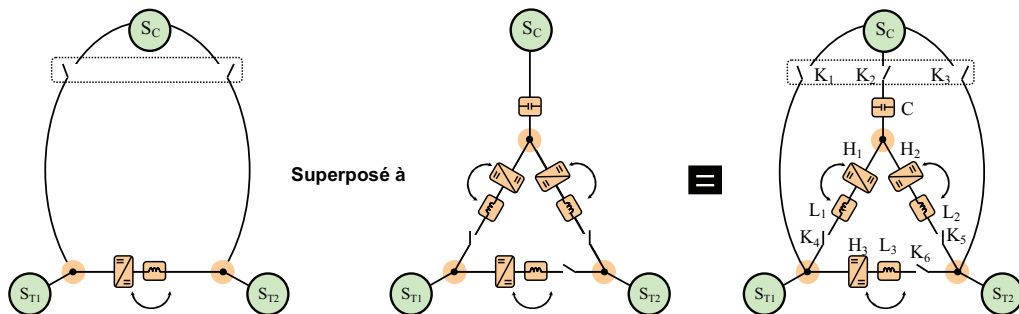


Figure 2-15. Construction de l'architecture générale d'un VE mixte

La caténaire ou le rail d'alimentation sont généralement modélisés par des sources de tension S_{T1} , le système de traction est semblable à celui d'un VE routier mixte et peut être modélisé par une source de courant équivalente S_C . En faisant l'hypothèse que la source de stockage d'énergie électrique est une source de tension S_{T2} (supercondensateurs, batteries, système PAC), on se retrouve avec un système à 3 sources semblables à celui du VE routier mixte précédemment étudié. A ce moment là,

l'architecture générale d'un VE guidé mixte est celle donnée Figure 2-16. La différence vient du fait qu'une partie des interconnexions de ces sources est embarquée et une partie est stationnaire.

2.1.3. Modélisation de l'architecture générale

L'architecture générale d'un VE mixte va être modélisée à l'aide de l'outil graphique REM. Cette architecture va par la suite être simplifiée afin d'alléger l'étude. La modélisation de chaque élément de la REM de l'architecture générale simplifiée sera développée.

2.1.3.1. REM

Un outil graphique, développé au L2EP de Lille, appelé **Représentation Energétique Macroscopique (REM)** est utilisé pour représenter chaque élément de l'architecture générale étudiée. La REM se base sur le principe d'action-réaction pour organiser les interconnexions des sous systèmes tout en respectant la causalité physique (c'est-à-dire causalité intégrale). Cette description souligne les propriétés énergétiques du système : élément d'accumulation, de conversion et de distribution d'énergie, et permet de déduire la structure de commande du système en appliquant des règles d'inversion [BOUSCAYROL 03] (Annexe C). La REM a déjà été appliquée dans de nombreux domaines de recherche : traction guidé [VERHILLE 07], [ALLEGRE 10c], véhicules hybrides [LHOMME 07], [CHEN 10], machines polyphasées [BRUYERE 09], systèmes de stockage [BOULON 09], systèmes de stockage mixte [ALLEGRE 09]... Les équations contenues dans chaque block REM seront détaillées par la suite.

2.1.3.2. Simplifications de l'étude

La REM de l'architecture générale d'un VE mixte est donnée Figure 2-17. Il faut préciser que les interrupteurs interdépendants sont modélisés par des aiguilleurs. L'usage d'aiguilleurs diffère de celui des travaux de Walter Lhomme pour lesquelles il permettait de commuter entre deux modèles d'un même élément (embrayage) [LHOMME 07]. Ici, un aiguilleur permet de commuter entre deux structures au travers des interrupteurs concernés. Par exemple, si on choisit de fermer l'interrupteur K_1 , il faut activer la voie 1 de l'aiguilleur (Figure 2-17).

A partir de la REM générale, on peut retrouver la REM particulière de l'ensemble des architectures envisageable d'un VE mixte.

Pour notre étude, toutes les architectures ne sont pas intéressantes. Généralement les inductances sont utilisées pour lisser le courant circulant dans les sources. On place donc les inductances du côté des sources de tension (S_{T1} ou de S_{T2}) de façon à ce qu'elles lissent le courant qui les traversent (Figure 2-18). L'inductance L_3 peut être placée du côté de S_{T1} ou de S_{T2} . Pour l'ensemble des exemples d'application traités par la suite, 1 des 2 sources de tension est toujours constituée de supercondensateurs et sera la source de tension S_{T2} . Nous avons donc choisi de placer L_3 du côté de la source S_{T2} car les supercondensateurs fonctionnent mieux aux basses fréquences (leur capacité diminue avec la fréquence).

Quand on connecte une source de tension directement sur la source de courant, c'est le cas par exemple pour un système où les batteries sont directement connectées au système de traction, la source de tension fait office de bus continu. Or si la source de tension est un banc de supercondensateurs, la variation de tension du bus peut être importante puisque l'état de charge des supercondensateurs est directement proportionnel à leur tension, (variation de tension jusqu'à 50%). Il faudrait donc surdimensionner le banc de supercondensateurs pour que les performances de la machine électrique ne soient pas dégradées lorsque la tension d'entrée du système de traction est égale à la tension minimale

des supercondensateurs. Nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte ce cas et de supprimer la liaison directe entre S_{T2} et S_C ainsi que l'interrupteur K_3 (cf. Figure 2-16).

L'architecture générale simplifiée d'un VE mixte est donnée Figure 2-18, et sa REM, Figure 2-19. Les interrupteurs K_3 et K_4 sont interdépendants et sont donc représentés en REM par un aiguilleur. Nous allons maintenant détailler les différents éléments de cette REM.

2.1.3.3. Modélisation des éléments passifs

Les éléments passifs de l'architecture générale se composent d'un condensateur qui constitue le bus continu du véhicule et de trois inductances qui permettent de lisser le courant circulant dans les sources de tension S_{T1} et S_{T2} .

Bus continu – Il est constitué d'un condensateur de filtrage. Son circuit électrique équivalent se compose d'une capacité C (Figure 2-20). En REM, il est représenté par un élément d'accumulation où la tension u_c est la variable d'état et donc la sortie de l'élément.

En choisissant une convention « générateur », il est modélisé par l'équation différentielle suivante :

$$C \frac{d}{dt} u_c = -i_c = -(i - i_{K2}) \quad (12)$$

Inductances de lissage – Leur circuit électrique équivalent se compose d'une inductance parfaite L_i en série avec une résistance r_{Li} qui prend en compte les pertes (Figure 2-21). En REM, elles sont représentées par des éléments d'accumulation où le courant i_i est la variable d'état. Elles sont modélisées par les équations différentielles suivantes:

$$L_i \frac{d}{dt} i_{Li} + r_{Li} i_i = -(u_i - u_{Si}) \text{ avec } i \in \{1, 2, 3\} \quad (13)$$

2.1.3.4. Modélisation des couplages électriques

Chaque couplage électrique représente un nœud de courant. La REM générale en compte 3.

Ils sont représentés par des éléments de couplage électrique / électrique et sont décrits par les relations suivantes :

$$\begin{cases} u_c \text{ en commun} \\ i = i_{h1} + i_{h2} \end{cases}, \begin{cases} u_{S1} \text{ en commun} \\ i_l = i_{S1} + i_{h3} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} u_2 \text{ en commun} \\ i_{S2} = i_2 + i_3 \end{cases} \quad (14)$$

2.1.3.5. Modélisation des convertisseurs statiques

L'architecture générale compte 3 convertisseurs statiques qui sont généralement des hacheurs deux quadrants réversibles en courant, abaisseurs ou élévateurs de tension. En REM, Ils sont représentés par des éléments de conversion électrique / électrique. Ils sont modélisés dans cette étude aux valeurs moyennes avec des interrupteurs supposés parfaits :

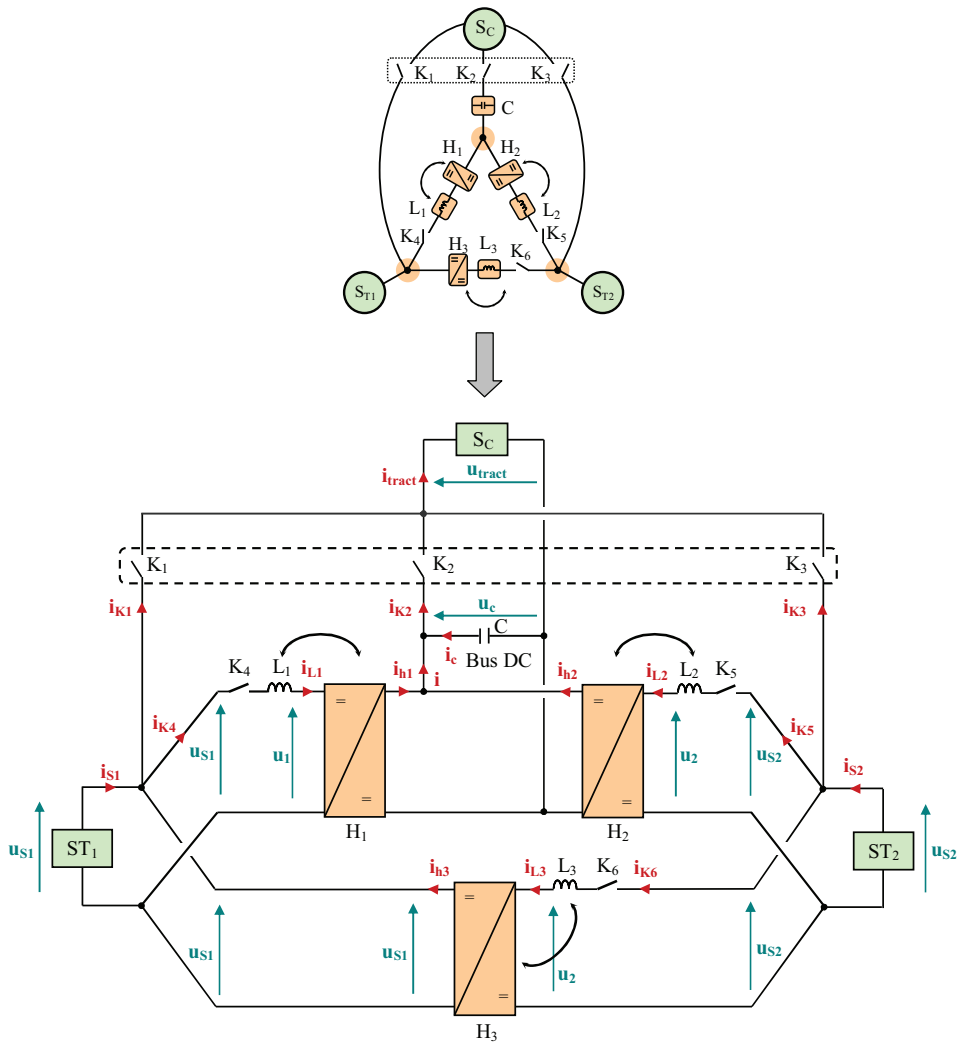


Figure 2-16. Architecture générale d'un VE mixte

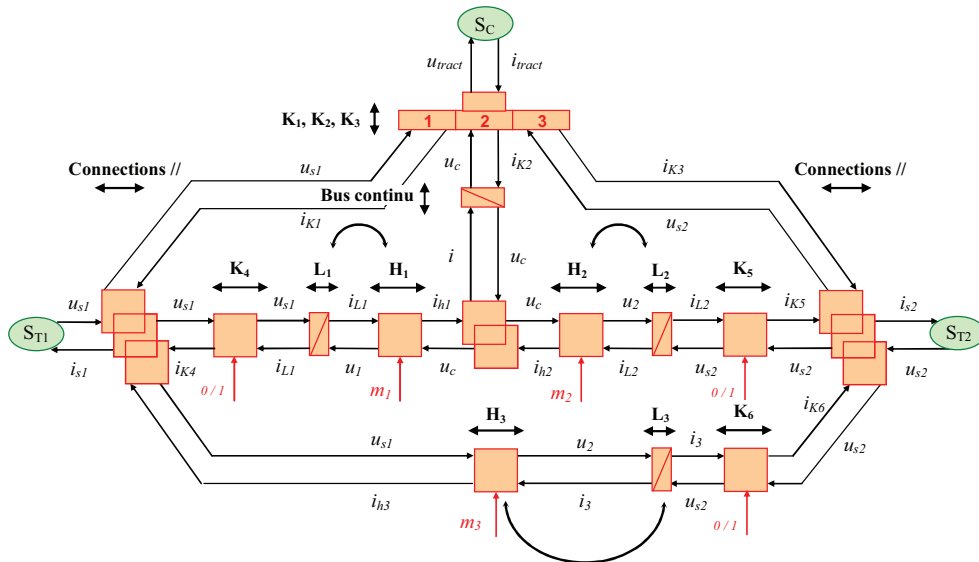


Figure 2-17. REM de l'architecture générale d'un VE mixte

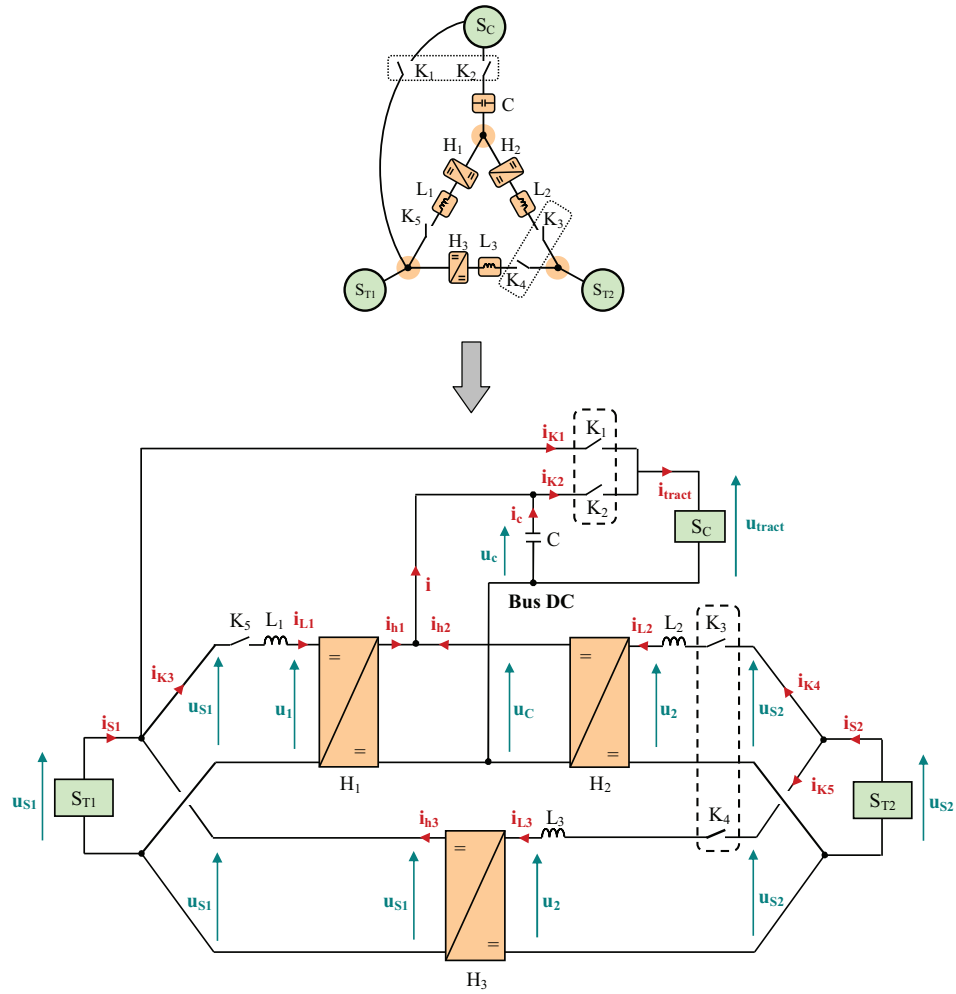


Figure 2-18. Architecture générale de VE mixte avec simplifications

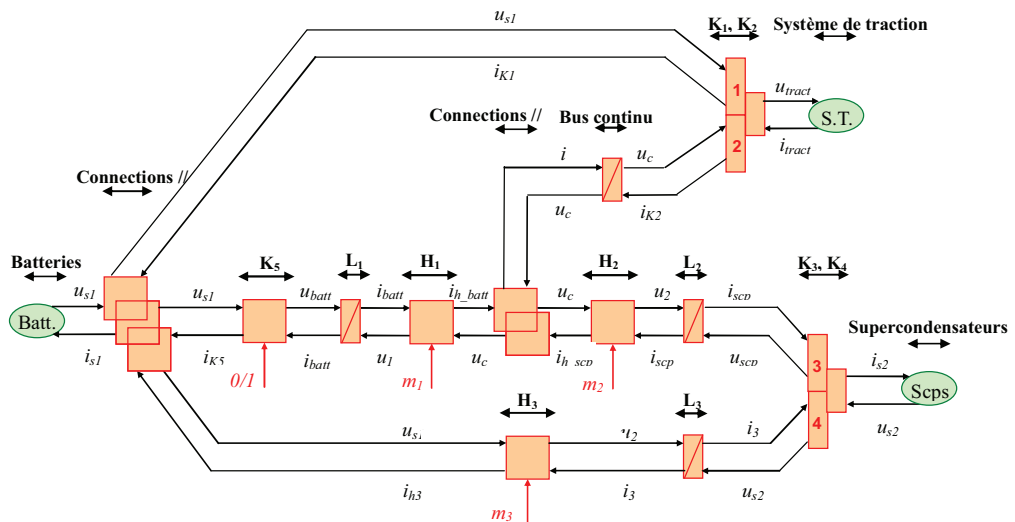


Figure 2-19. REM de l'architecture générale 2 d'un VE mixte avec simplification

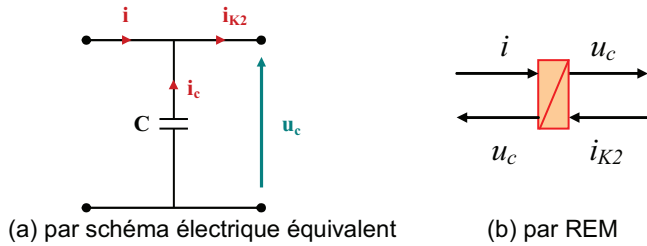


Figure 2-20. Représentations du bus continu

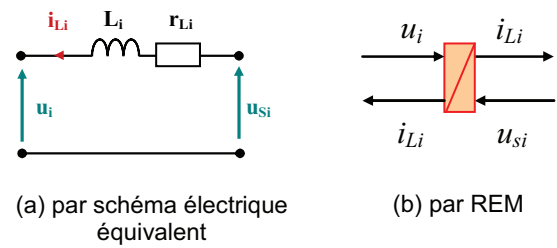


Figure 2-21. Représentations des inductances de lissage

Pour des hacheurs abaisseurs en tension

$$\begin{cases} u_i = m_i u_c \\ i_{hi} = m_i i_{Li} \end{cases} \text{ avec } 0 < m_i < 1 \text{ et } i = \{1,2,3\} \quad (15)$$

Pour des hacheurs éleveurs en tension

$$\begin{cases} u_c = m_i u_i \\ i_{Li} = m_i i_{hi} \end{cases} \text{ avec } 0 < m_i < 1 \text{ et } i = \{1,2,3\} \quad (16)$$

Où m_i est la fonction de modulation du hacheur 1 ou 2 ou 3.

Une représentation aux valeurs instantanées peut cependant être contenue dans ces éléments REM [DELARUE 03].

2.1.3.6. Modélisation des sources de tension

Seuls les modèles de supercondensateurs et batteries seront développés ici car les applications traitées par la suite utilisent uniquement ces deux sources de stockage. En REM, ils sont généralement représentés par des sources.

❖ Batteries Pb, Ni-MH, Ni-Cd

Différentes batteries ont été utilisées et modélisées. Au L2EP sont disponibles des batteries Plomb (Pb) (16Ah, 12V GEL HAZE) et Nickel Métal Hydrure (Ni-MH) (9Ah, 24V SAFT) (Annexe D). Elles ont été modélisées au cours d'un séjour au LTE de Bron en utilisant les bancs de caractérisation disponibles et les outils de modélisation développés notamment pour des batteries Ni-MH et Lithium (Figure 2-22), [MONTARU 08]. Les modèles retenus pour les deux types de batteries sont des modèles de Randles simplifiés où l'impédance de Warburg est approximée par 5 circuits $R'C'$ parallèles (Figure 2-23). Ce modèle dynamique permet de prendre en compte l'ensemble des phénomènes qui interviennent au sein de la batterie : surtensions ohmiques, de transfert de charge, de polarisation et de diffusion (cf. chapitre 1, § 1.2.2.2.2).



Figure 2-22. batteries sur 2 bancs de caractérisation du LTE

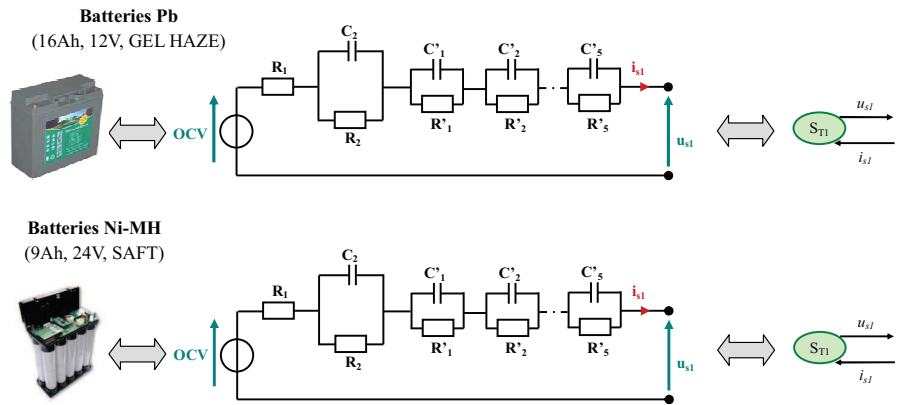


Figure 2-23. représentations utilisées pour les batteries Pb et Ni-MH

Ces modèles ont été identifiés à partir de mesures d'impédancemétrie pour caractériser les phénomènes à dynamiques rapides (surtensions ohmiques, de transfert de charge et de polarisation) et à partir de mesures temporelles pour caractériser notamment les phénomènes à dynamique lente (surtensions de diffusion). Ces modèles ont été établis pour différents états de charge (20, 40, 60, 80%), l'influence de la température sur les paramètres du modèle n'a pas été considérée. La non-linéarité de certains paramètres avec le courant (c'est le cas par exemple de R_2 de la batterie Pb) a été prise en compte en moyennant ces paramètres sur la gamme d'intensité considérée. L'hystérésis de l'OCV en fonction du SOC n'a pas été modélisée : c'est la valeur moyenne de l'OCV en fonction du SOC après interpolation qui a été utilisée (Figure 2-24). Une modélisation de cet hystérésis est possible, notamment pour la batterie Ni-MH où celui-ci est non négligeable [THELE 08], [MONTARU 09]. Le rendement faradique a été choisi égal à 1 quelque soit le SOC de la batterie. Cette modélisation des batteries est détaillée en Annexe D.

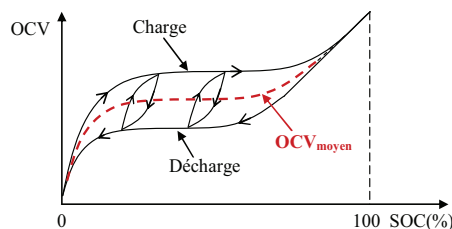


Figure 2-24. Variation de l'OCV avec le SOC

Au LTE, le microbus électrique hybride mixte traité comme application par la suite, utilisent des batteries Nickel Cadmium (Figure 2-25) (Ni-Cd) (100Ah, 12V SAFT). Un modèle de ces batteries développé par le LTE a été mis à notre disposition. C'est un modèle simple (cf. chapitre 1, § 1.2.2.2.2) où la résistance qui prend en compte les surtensions ohmiques est différenciée en décharge et en recharge. La variation des paramètres avec le SOC et la température a été prise en compte (Figure 2-26).

On peut remarquer que les modèles utilisés des batteries Pb, Ni-MH et Ni-Cd ne sont pas homogènes. Pour comparer les technologies de batteries, il aurait été intéressant d'uniformiser ces modèles et notamment d'améliorer celui des batteries Ni-Cd. cependant, l'identification d'un modèle de type Randles nécessite des travaux supplémentaires.



Figure 2-25. Batteries Ni-Cd installées sur le microbus du LTE

Batteries Ni-Cd
100Ah, 12V SAFT

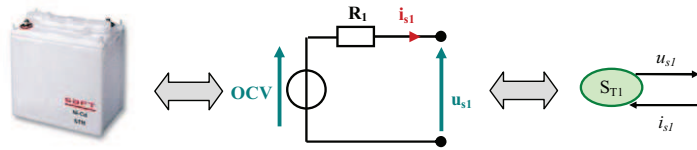


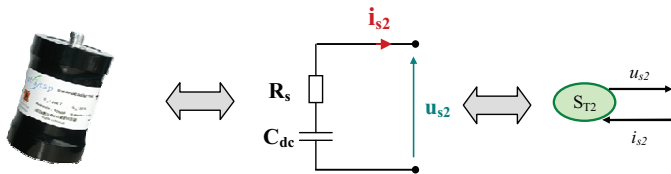
Figure 2-26. Modèle utilisé pour les batteries Ni-Cd

❖ *Supercondensateurs*

Différents supercondensateurs ont été utilisés et modélisés. Au L2EP sont disponibles des supercondensateurs Batscap (2600F, 2,5V) (Annexe E). Le modèle utilisé est un modèle RC, basé sur les données constructeur identifié à partir de mesures potentiométriques (Figure 2-27), (cf. chapitre 1, § 2.2.3.2). Au LTE, Le microbus électrique hybride mixte traité comme application par la suite, utilisent des supercondensateurs Bastcap (5000 F, 2,7V) (Figure 2-28). Un modèle de ces supercondensateurs, développé au LTN, INRETS, de Versailles-Satory, a été mis à notre disposition (cf. Figure 2-27) [HAMMAR 06]. Ce modèle a été simplifié de façon à uniformiser nos modèles de supercondensateurs et avoir un modèle RC pour les deux types de supercondensateurs considérés.

Ce modèle dynamique semble suffisant pour les applications développées par la suite où les courants de charge et de décharge ont des fréquences élevées et où le phénomène de relaxation intervient peu (cf. chapitre 1, § 1.2.2.3.2).

Supercondensateurs Batscap du L2EP
(2600F / 2,5 V)



Supercondensateurs Batscap du LTE
(5000F / 2,5 V)

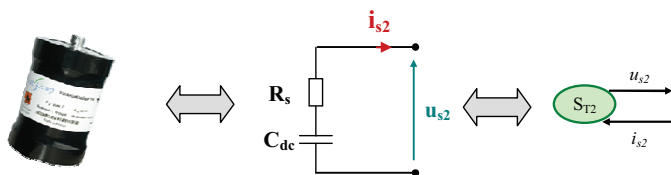


Figure 2-27. Modèle utilisé pour les supercondensateurs du L2EP



Figure 2-28. Armoire de supercondensateurs embarqués dans le microbus du LTE

2.1.3.7. Modélisation de la source de courant

La source de courant S_C est constituée du système de traction. Le système de traction est simplifié car l'étude porte notamment sur la gestion d'énergie dans les sources de tension. Les principaux éléments sont modélisés de façon à ce que le courant de traction i_{tract} soit représentatif du courant de traction d'un véhicule réel. Pour les deux applications développées par la suite, le système de traction se compose d'un onduleur, d'une machine électrique, d'un pont différentiel, de deux roues motrices, d'un châssis et de l'environnement dans lequel circule le véhicule (Figure 2-29). Ce modèle simplifié peut varier d'une application à l'autre mais reste toujours une source de courant équivalente. Par

exemple, on pourrait y inclure les auxiliaires ou le frein mécanique. A ce moment là le profil du courant de traction est modifié (Figure 2-30). Des travaux sur la modélisation de systèmes de traction plus complexes utilisant l’outil REM ont déjà été développés au laboratoire [LHOMME 07], [VERHILLE 07], [CHEN 10].

Onduleur et machine électrique – En REM, ils sont représentés par un élément de conversion électrique / mécanique avec pour entrée de réglage, le couple de la machine électrique de référence C_{me_ref} (Figure 2-31) [LETROUVE 09]. La machine électrique de traction est une machine asynchrone pour les deux applications développées par la suite. L’onduleur et la machine électrique associée sont modélisés avec un modèle quasi-statique (17), (18). Il est important de noter que ce modèle ne peut être utilisé que dans un but énergétique. En effet, un modèle dynamique serait nécessaire si on veut réaliser la commande de la machine [BOUSCAYROL 03].

$$C_{me} = \frac{1}{1 + \tau_{BF}} C_{ref} \tag{17}$$

$$i_{tract} = \frac{P_{tract} - pertes}{u_c} \text{ avec } P_{tract} = C_{em} \cdot \Omega_{em} \tag{18}$$

Où τ_{BF} est la constante en boucle fermée de la machine électrique après correction et P_{tract} la puissance de traction.

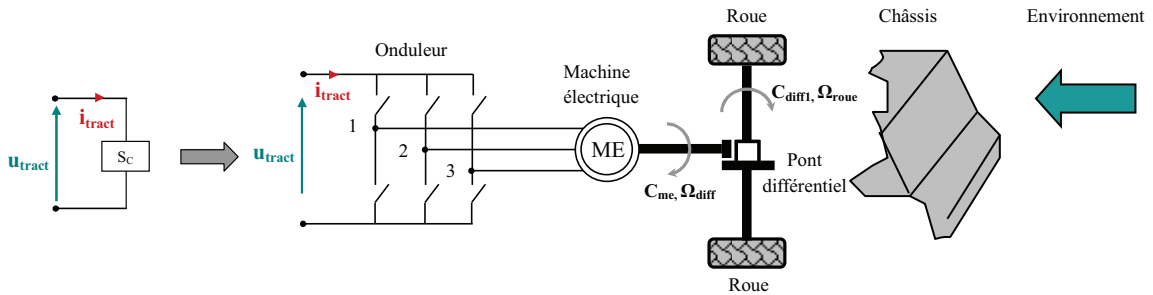


Figure 2-29. Système de traction simplifié

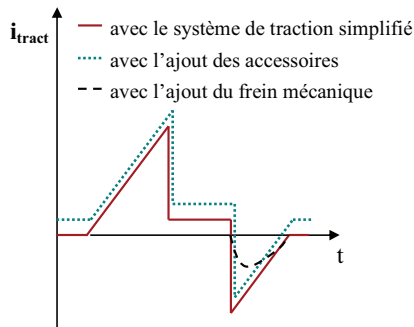


Figure 2-30. Courant de traction

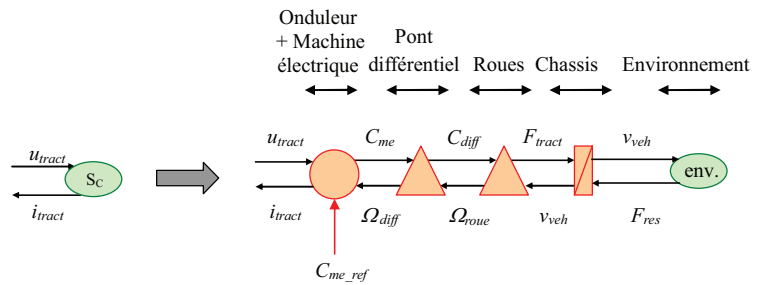


Figure 2-31. REM du système de traction simplifié

Pour la première application (voiture électrique mixte), le rendement de la machine électrique est considéré comme constant et égal à 95%.

Pour la deuxième application (microbus électrique mixte), Un modèle de l’onduleur et la machine électrique 40kW associée a été mis à ma disposition par le LTE, c’est un modèle basé sur une cartographie donnant le couple maximal pouvant être développé par la machine électrique en fonction de sa vitesse de rotation (Figure 2-32). C’est un modèle statique ($\tau_{BF} \rightarrow 0$), les pertes ne sont pas constantes et sont déterminées à partir de la cartographie.

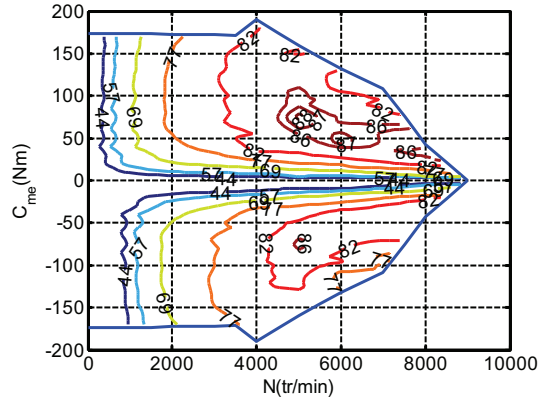


Figure 2-32. Cartographie du rendement de la machine électrique du microbus et de son convertisseur associé

Pont différentiel – Le pont différentiel permet de répartir le couple sur chaque roue motrice et de les faire tourner à des vitesses différentes, notamment dans les virages. Il permet également de multiplier le couple transmis au niveau des roues (et démultiplie la vitesse de rotation des roues). En effet, il faut que le couple transmissible soit toujours supérieur au couple résistant. Contrairement à la boîte de vitesses qui est un démultiplieur intermittent, le pont différentiel est un démultiplieur permanent [MEMETEAU 06]. Il est supposé que le véhicule roule en ligne droite et le contact entre roue et route est négligé. Avec ces hypothèses, en REM un pont différentiel est simplement représenté par un élément de conversion mécanique / mécanique et est défini par la relation suivante [VERHILLE 07] :

$$\begin{cases} C_{diff} = k_{diff} C_{me} \\ \Omega_{diff} = k_{diff} \Omega_{roue} \end{cases} \quad (19)$$

Où k_{diff} est le rapport du pont différentiel.

Roues – Elles permettent de passer d’un mouvement de rotation donné par le pont différentiel au mouvement de translation du véhicule. Avec les hypothèses émises pour le pont différentiel, elles peuvent se ramener à une seule roue équivalente. En REM, elles sont ainsi représentées par un unique élément de conversion mécanique / mécanique et décrites par la relation suivante :

$$\begin{cases} F_{tract} = \frac{C_{diff}}{R_{roue}} \\ v_{veh} = \frac{\Omega_{roue}}{R_{roue}} \end{cases} \quad (20)$$

Où R_{roue} est le rayon d’une roue.

Châssis – Il constitue la structure qui supporte et rigidifie tous les éléments constituant le véhicule. En REM, il est représenté par un élément d’accumulation d’énergie où la vitesse du véhicule v_{veh} est la variable d’état et donc la sortie de l’élément. L’ensemble des inerties du système de traction (inertie de la machine électrique, des roues) sont ramenée au niveau du châssis selon la règle de concaténation [BOUSCAYROL 03]. Il est modélisé par l’équation suivante issue du principe fondamental de la dynamique (Figure 2-33) :

$$M_{eq} \frac{d}{dt} \vec{v}_{veh} = \sum \vec{F} \xrightarrow{\text{projection sur l'axe } x} M_{eq} \frac{d}{dt} v_{veh} = F_{tract} - F_{res} \quad (21)$$

$$M_{eq} = M_{veh} + \left(\frac{k_{diff}}{R_{roue}}\right)^2 J_{me} + n_{roue} \left(\frac{I}{R_{roue}}\right)^2 J_{roue} \quad (22)$$

Où M_{eq} est la masse équivalente du véhicule, M_{veh} , la masse du véhicule, J_{me} est l'inertie de la machine électrique, n_{roue} le nombre de roues et J_{roue} l'inertie d'une roue.

Environnement – C'est l'environnement dans lequel circule le véhicule. Pour simplifier l'étude, nous supposons que le véhicule est un système rigide et peut, par conséquent, être assimilé à un point situé en son centre de gravité de même masse. Les forces appliquées au centre de gravité du véhicule sont : la force de traction, \vec{F}_{tract} , développée par la partie motrice du métro et la force de résistance à l'avancement globale, \vec{F}_{res} (Figure 2-33). Celle-ci est constituée de différents types d'efforts : les efforts statiques F_{stat} principalement dus au contact pneu / sol, les efforts visqueux F_{viscq} qui représentent les pertes dans les organes hydrauliques, les efforts aérodynamiques F_{aero} dus aux écoulements d'air autour du véhicule, les efforts dus aux pentes F_{pente} . En effet, le poids véhicule \vec{P} se décompose en une force perpendiculaire à la voie, \vec{F}_n et en une force tangentielle \vec{F}_{pente} si l'on ne considère que la force tangentielle (Figure 2-34) :

$$F_{res} = F_{stat} + F_{viscq} + F_{aero} + F_{pente} \quad (23)$$

$$\begin{cases} F_{visc} = c_{visc} v_{veh} \text{sign}(v_{veh}) \\ F_{aero} = c_{aero} (v_{veh} - v_{vent})^2 \text{sign}(v_{veh} - v_{vent}) \\ F_{pente} = M_{veh} g \sin \alpha \approx M_{veh} g p \quad \text{avec} \quad p = \tan \alpha \approx \sin \alpha \quad \text{pour} \quad \alpha \leq 10^\circ \end{cases} \quad (24)$$

Où c_{visc} est le coefficient de frottements visqueux, c_{aero} , le coefficient de frottements aérodynamiques, v_{vent} , la vitesse du vent, g , la gravité, α , l'inclinaison et p , la pente.

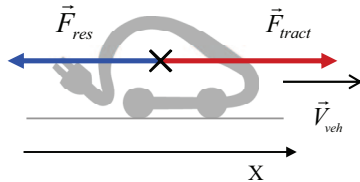


Figure 2-33. Forces appliquées au centre de gravité du véhicule

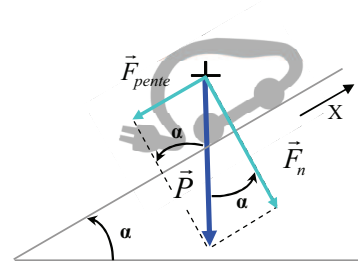


Figure 2-34. Forces dues à la pente

2.1.4. Applications de la méthodologie de modélisation

La méthodologie de modélisation développée précédemment va être appliquée à deux VEs mixtes : une voiture électrique mixte et à un microbus électrique mixte. Pour la première application, tous les paramètres sont connus mais le véhicule n'est pas un véhicule réel. Pour la deuxième application, l'ensemble des paramètres n'est pas connu mais le véhicule est réel. Les deux applications ont des architectures et des contraintes différentes et on va voir que la méthodologie de modélisation développée est tout de même applicable.

2.1.4.1. Application à un voiture électrique mixte

❖ *Système étudié*

Le véhicule considéré est un VE routier mixte batteries / supercondensateurs. Les batteries Ni-MH constituent la source de tension S_{T1} , les supercondensateurs Batscap du L2EP la source de tension S_{T2} et le système de traction, la source de courant S_C (Figure 2-35). L'association des batteries et supercondensateurs est une association active avec contrôle du bus continu et convertisseurs mis en parallèle.

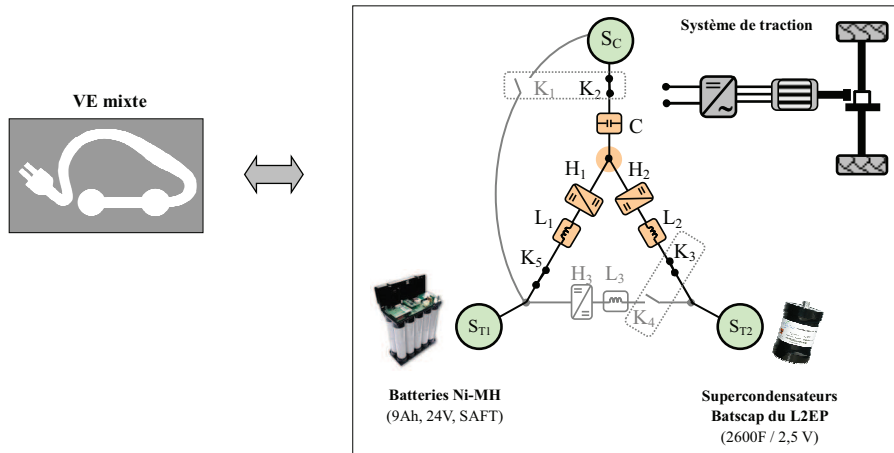


Figure 2-35. VE mixte étudié

Les convertisseurs statiques H_1 et H_2 sont des hacheurs réversibles en courant et abaisseurs de tension (en partant du bus continu). Le banc de batteries S_{T1} est constitué de 4 branches de 7 batteries Ni-MH (9Ah, 24V, SAFT). Le banc de supercondensateurs S_{T2} est constitué de 80 supercondensateurs Batscap du L2EP (2600F /2,5V) mis en série. Le bus continu est fixé à 250 V. La partie mécanique du système de traction est basée sur celle d'une Renault Clio standard. Le système de traction se compose d'une machine électrique et d'un différentiel mécanique connecté via un onduleur au bus continu. La machine électrique est une machine asynchrone pouvant délivrer une puissance maximale de 32 kW. Les principales caractéristiques du véhicule sont données Tableau 2-1).

Tableau 2-1 principales caractéristiques de la voiture électrique mixte

SSE électrique mixte	
Bus continu : $C = 9,9 \text{ mF}$, $u_c = 250 \text{ V}$	
Inductances: $L_1 = L_2 = 1,4 \text{ mH}$, $r_{L1} = r_{L2} = 6,4 \text{ m}\Omega$	
Batteries : Batteries Ni-MH (9 Ah,24V) : $N_{p_batt} = 10$, $N_{s_batt} = 7$, $U_{batt_N} = 168 \text{ V}$	
Supercondensateurs : Scp. Batscap (2600F, 2,5V): $N_{p_scp} = 1$, $N_{s_scp} = 80$, $U_{scp_N} = 33 \text{ V}$	
Système de traction	
Moteur : $J_{me} = 0,12 \text{ kg.m}^2$	Chassis: $M_{veh} = 1613 \text{ kg}$, $M_{eq} = 2045 \text{ kg}$
Différentiel : $k_{diff} = 5$, $\eta_{diff} = 0,8$	Environnement : $F_{stat} = 85 \text{ N}$, $C_{aero} = 0,4280$, $C_{visc} = 1,88$
Roue : $R_{roue} = 0,26 \text{ m}$, $J_{roue} = 4,3 \text{ kg.m}^2$, $N_{roue} = 4$	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

❖ *Obtention de la REM du système à partir de la REM générale*

L'architecture du véhicule étudié peut être obtenue à partir de l'architecture générale simplifiée si les voies 2 et 3 des aiguilleurs (interrupteurs K_2 et K_3 fermés) sont activées et l'interrupteur K_5 fermé (Figure 2-36).

De même, la REM du véhicule étudié peut être obtenue à partir de la REM de l'architecture générale simplifiée si les voies 2 et 3 des aiguilleurs sont activées (interrupteurs K_1 et K_4 ouverts et interrupteur K_2 et K_3 fermés) (Figure 2-37).

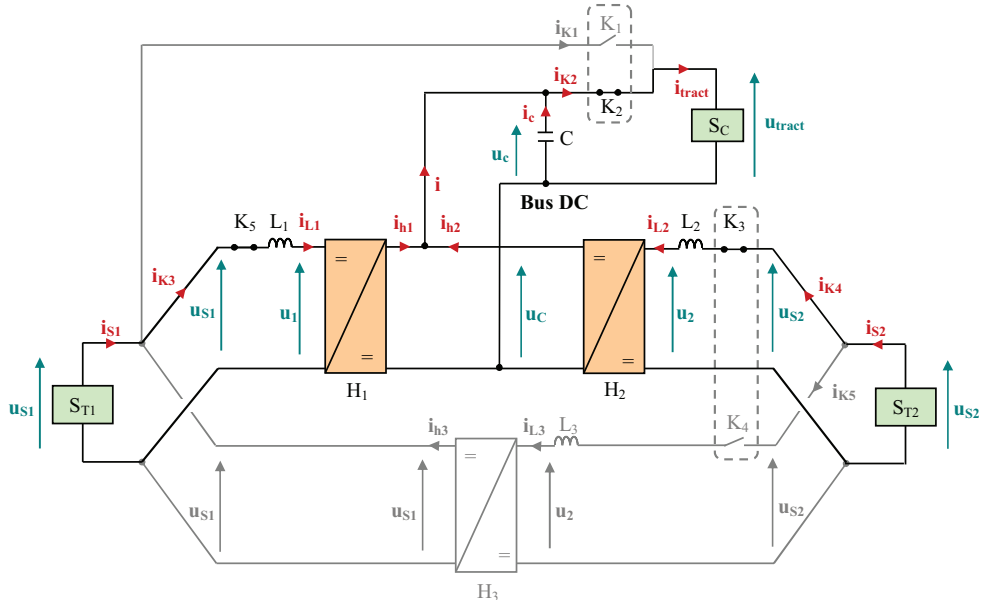


Figure 2-36. Architecture de la voiture électrique mixte

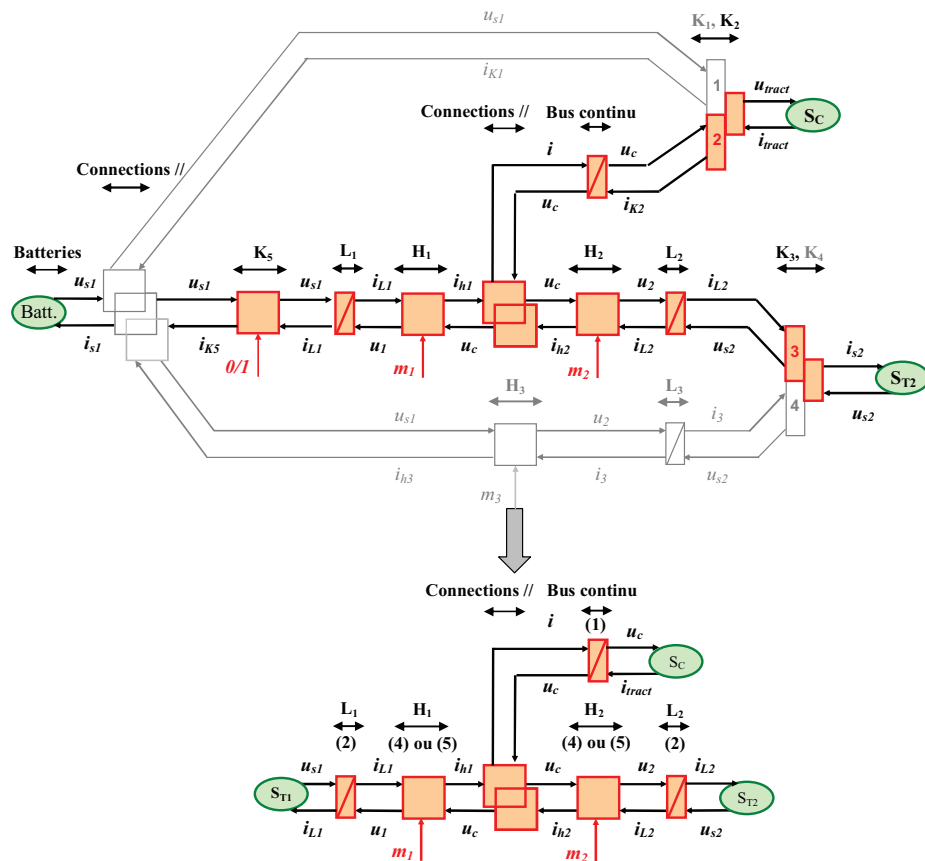


Figure 2-37. REM de la voiture électrique mixte

Il est important de noter que l'architecture du véhicule étudié et sa REM auraient également pu être déduite de l'architecture générale sans simplifications et la REM de cette architecture générale (cf. Figure 2-16, Figure 2-17).

2.1.4.2. Application à un microbus électrique mixte

❖ *Système étudié*

Le véhicule considéré est un microbus électrique mixte batteries / supercondensateur, disponible au LTE de Bron. En réalité, ce microbus est un microbus électrique hybride mixte, mais nous ne le considérons dans cette partie que lorsqu'il fonctionne en mode tout électrique.

Les batteries Ni-Cd du LTE constitueront la source de tension S_{T1} , les supercondensateurs Batscap du LTE la source de tension S_{T2} et le système de traction, la source de courant S_C (Figure 2-38). L'association des batteries et supercondensateurs est une association active sans contrôle du bus continu. Le convertisseur H_3 est un hacheur réversible en courant et abaisseur de tension (en partant des batteries). Le banc de batteries est constitué de 32 batteries Ni-Cd (100Ah, 6V, SAFT). Le banc de supercondensateurs est constitué de 60 supercondensateurs Batscap (5000F / 2,7V) en série. Le système de traction se compose d'une machine électrique avec un différentiel mécanique connectée via un onduleur aux batteries. La machine électrique est une machine asynchrone pouvant délivrer une puissance maximale de 40 kW. Les principales caractéristiques du véhicule sont données Tableau 2-2. Obtention de la REM du système à partir de la REM générale

L'architecture du véhicule étudié peut être obtenue à partir de l'architecture générale simplifiée si les voies 1 et 4 des aiguilleurs (interrupteurs K_1 et K_4 fermés) sont activées et l'interrupteur K_5 ouvert (Figure 2-39). De même, la REM du véhicule étudié peut être obtenue à partir de la REM de l'architecture générale simplifiée si les voies 1 et 4 des aiguilleurs sont activées (interrupteurs K_1 et K_4 fermé et interrupteur K_2 et K_3 ouverts) (Figure 2-40).

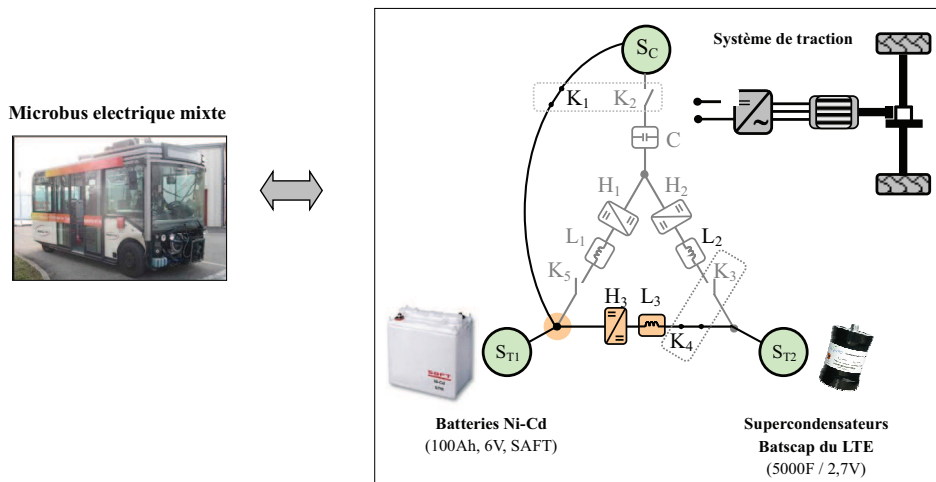


Figure 2-38. Microbus électrique mixte étudié

Tableau 2-2 principales caractéristiques du microbus électrique mixte

SSE électrique mixte	
Inductances: $L_1 = 1 \text{ mH}$, $r_{L1} = 10 \text{ m}\Omega$	
Batteries : Batteries Ni-Cd (100Ah,6V) : $N_{p_batt} = 1$, $N_{s_batt} = 32$, $U_{batt_N} = 192 \text{ V}$	
Supercondensateurs : Scp. Batscap (5000F, 2,7V): $N_{p_scp} = 1$, $N_{s_scp} = 60$, $U_{scp_N} = 162 \text{ V}$	
Système de traction	
Moteur : $J_{me} = 0.0342 \text{ kg.m}^2$	Chassis: $M_{veh} = 3382 \text{ kg}$, $M_{eq} = 3523 \text{ kg}$
Différentiel : $k_{diff} = 18,29$	
Roue : $R_{roue} = 0,3229 \text{ m}$, $J_{roue} = 0,82 \text{ kg.m}^2$, $N_{roue} = 4$	Environnement : $F_{stat} = 337\text{N}$, $C_{aero} = 1,86$, $c_{visc} = 1$
$g = 9,81\text{m/s}^2$	

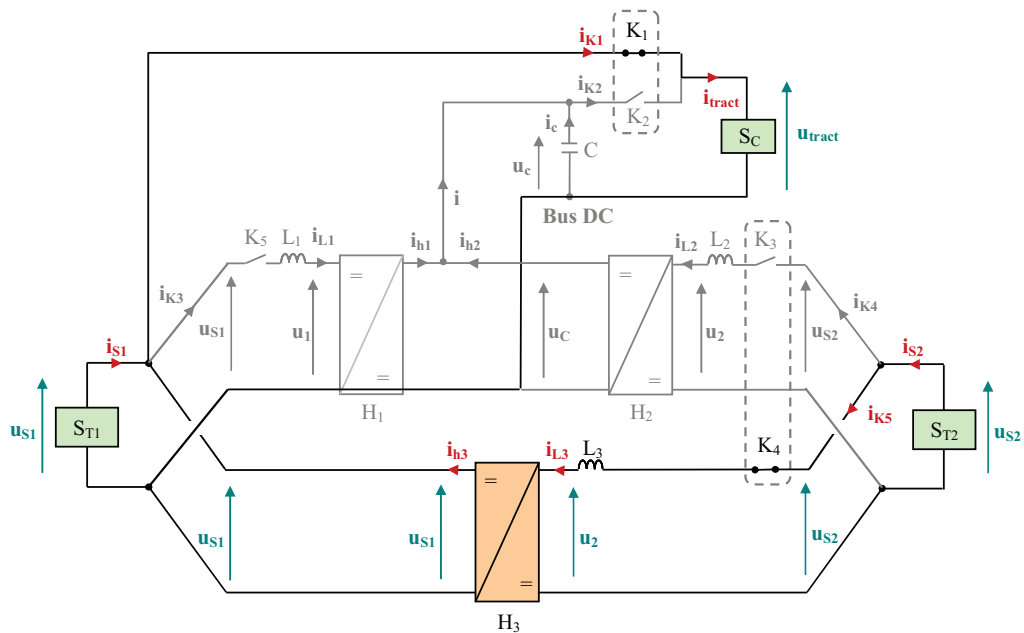


Figure 2-39. Architecture du microbus électrique mixte

Il est important de noter que l'architecture du véhicule étudié et sa REM auraient également pu être déduite de l'architecture générale sans simplifications et la REM de cette architecture générale (cf. Figure 2-16, Figure 2-17).

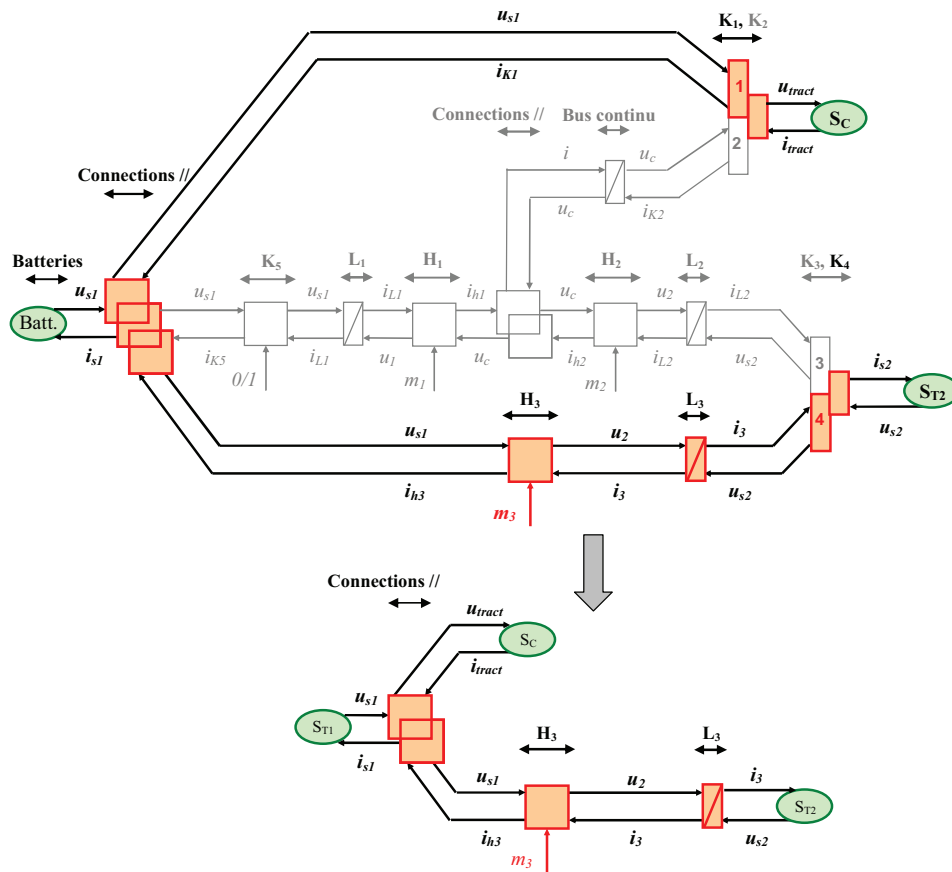


Figure 2-40. REM du microbus électrique mixte

2.2. Extension à des véhicules mixtes à 4 sources électriques

L’objectif de cette partie est d’étendre la méthodologie de modélisation développée, aux véhicules à 4 sources électriques. Cette méthodologie sera appliquée, en particulier, à un véhicule électrique hybride mixte de type série et à un métro électrique mixte à 4 sources électriques.

2.2.1. Approche

L’extension de la méthodologie va se baser sur un véhicule de type VEH mixte, mais on verra qu’elle peut également être appliquée à des VE mixtes à 4 sources électriques.

De façon générale, dans un VEH mixte, la traction du véhicule est assurée par 2 sources d’énergie électrique et 1 source d’énergie fossile. De plus, le système de traction et le groupe électrogène peuvent également être modélisés par 2 sources électriques équivalentes. Ainsi un VEH mixte se ramène à un système composé de 4 sources électriques.

Comme pour un VE mixte à 3 sources électriques, il existe de nombreuses architectures d’association de ces sources. Une architecture et une REM générales, capable de décrire l’ensemble des architectures de véhicules mixtes à 4 sources, vont être élaborées. Cette généralisation va permettre une analyse globale du système et de pouvoir simuler différentes architectures de véhicules mixtes avec un même programme.

La méthodologie développée va être appliquée à deux véhicules mixtes à 4 sources électriques qui ont des architectures différentes, une voiture électrique hybride mixte et un métro électrique mixte à 4 sources électriques. L’architecture de chacun de ces véhicules est retrouvée à partir de

l'architecture générale. De la même manière, la REM de chacun de ces véhicules est retrouvée à partir la REM générale (cf. Figure 2-1).

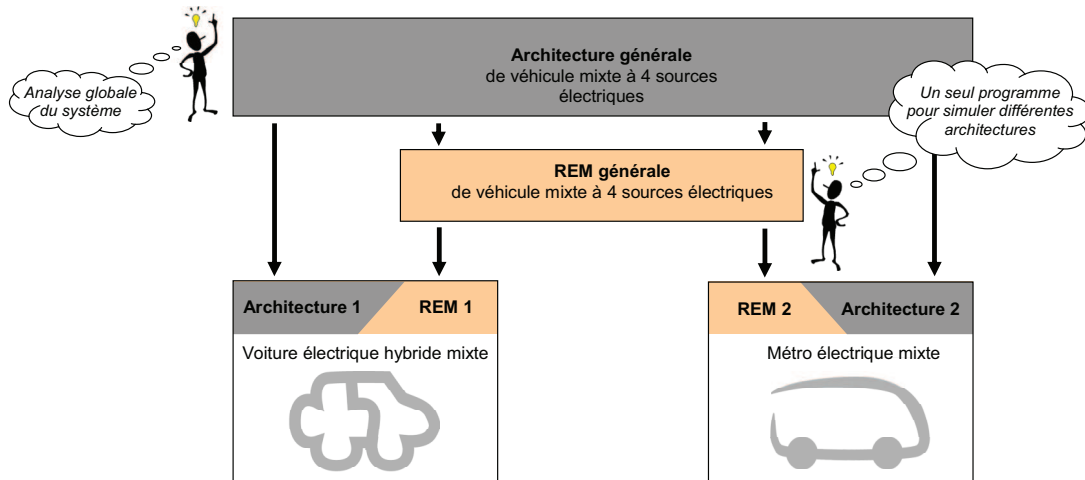


Figure 2-41. Approche de la méthodologie

Cette approche globale se concentre principalement sur les couplages électriques au sein du véhicule. Une approche globale sur les couplages mécaniques a déjà été traitée dans la thèse de Keyu Chen [CHEN 10].

2.2.2. Construction d'une architecture générale

Après avoir posé le cadre de l'étude, une première architecture générale de véhicule mixte à 4 sources électriques sans bus continu contrôlé est construite, à partir de l'architecture générale d'un VE mixte sans bus continu contrôlé, puis une seconde architecture générale de véhicule mixte à 4 sources électriques avec bus continu contrôlé, à partir de l'architecture générale d'un VE mixte avec bus continu contrôlé. La superposition de ces deux architectures conduit à une architecture générale de véhicule mixte à 4 sources électriques.

2.2.2.1. Cadre de l'étude

L'étude se base sur un véhicule de type VEH mixte. Dans cette étude, nous nous intéressons à la façon de connecter électriquement et en parallèle les 4 sources électriques d'un VEH mixte. **L'extension de la méthodologie développée ne sera donc valable que pour les VEH mixte de type hybride série ou série-parallèle.** En effet pour ces deux types d'architectures, le groupe électrogène est connecté électriquement aux autres sources électriques. En revanche, l'architecture de type hybride parallèle, le groupe électrogène est couplé mécaniquement au système de traction et il n'y a pas de lien électrique entre le groupe électrogène et les autres sources électriques. Pour ce type de véhicule, le système de traction associé au groupe électrogène peut être modélisé par une seule source électrique équivalente. Ainsi l'architecture d'un VEH mixte de type parallèle se ramène à un système à 3 sources électriques.

On a vu au paragraphe précédent que pour un VE mixte, système composé de 3 sources électriques, il existe toujours au moins 1 couplage électrique si l'on veut connecter ces sources en parallèle. En effet, chaque couplage électrique reçoit 3 liaisons parallèles provenant directement ou indirectement de 3 sources indépendantes. Pour un VEH mixte de type série ou série-parallèle, il y aura toujours au moins 2 couplages électriques (Figure 2-42).

De façon générale, quand on veut connecter N_s sources électriques en parallèle, le nombre minimum de couplages électriques N_{c_min} est donné par la relation suivante :

$$N_{c_min} = N_s - 2 \tag{25}$$

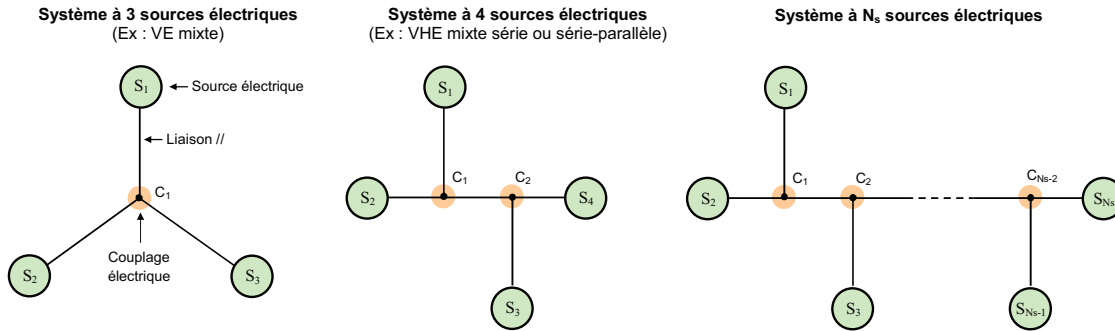


Figure 2-42. Connexion parallèle de 3, 4, ..., N_s sources électriques

Classiquement, pour un VEH routier mixte, la traction est assurée par 2 sources de stockage d'énergie électrique et 1 source d'énergie fossile. Nous ferons l'hypothèse par la suite que les 2 sources d'énergie électrique sont des sources de tension, S_{T1} et S_{T2} , ce qui est le cas pour l'association batteries / supercondensateurs et que le système de traction d'un véhicule peut être modélisé par 1 source de courant équivalente S_{C1} .

Le groupe électrogène constitué d'un réservoir de carburant (source d'énergie fossile), d'un moteur thermique, d'une génératrice électrique et d'un onduleur, peut également être modélisé par une source de courant équivalente S_{C2} (Figure 2-43).

Pour un VEH de type série, il n'y a pas de couplage mécanique entre la génératrice électrique et le système de traction. Par contre pour un VEH de type série-parallèle, la génératrice est couplée mécaniquement avec le système de traction. Cette liaison mécanique n'apparaîtra pas sur l'architecture générale, car nous nous intéressons pour l'étude uniquement aux couplages électriques.

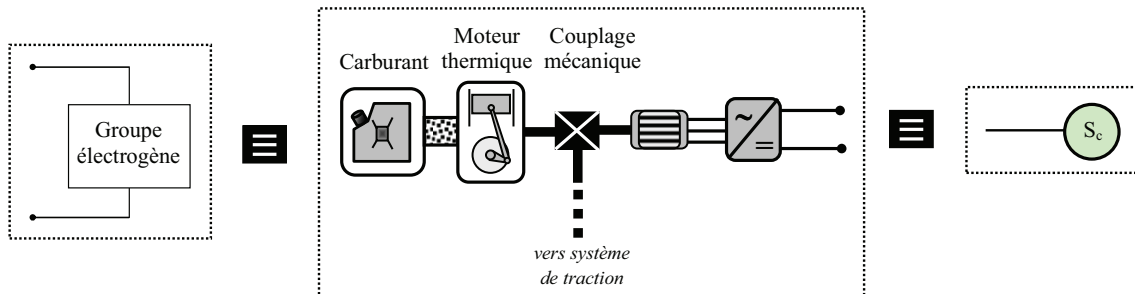


Figure 2-43. Groupe électrogène modélisé par une source de courant

2.2.2.2. Architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques sans bus continu contrôlé

Si l'on veut connecter en parallèle 4 sources électriques distinctes d'un point de vue fonctionnel, la seule possibilité consiste à connecter 1 source de tension à 3 sources de courant. La source de tension impose ainsi sa tension aux 3 autres sources.

Dans le VEH routier mixte étudié, on ne prend pas en compte dans un premier temps le bus continu connecté au système de traction : on dispose alors de 2 sources de courant, S_{C1} et S_{C2} , et 2 sources de tensions, S_{T1} et S_{T2} .

L'architecture générale d'un VE sans bus continu contrôlé a été établie au paragraphe précédent (Figure 2-44). Un VE se ramène à un système composé de 2 sources de tension S_{T1} et S_{T2} et d'1 source de courant S_{C1} . A partir de cette architecture générale, par symétrie, on obtient l'architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques sans bus continu contrôlé (Figure 2-45).

Les interrupteurs K_1 et K_2 ne peuvent pas être passants ou ouverts en même temps. Il en est de même pour les interrupteurs K_3 et K_4 .

2.2.2.3. Architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques avec bus continu contrôlé

Dans le VEH routier mixte étudié, on prend en compte le bus continu connecté au système de traction ainsi que celui qui pourrait être connecté au groupe électrogène. Le système de traction connecté au bus continu constitue une source de tension équivalente S_{T-eq1} de part la nature capacitive du bus continu. Il en est de même pour le groupe électrogène qui peut être connecté à un second bus continu qui constitue la source de tension équivalente S_{T-eq2} . Ainsi, on dispose de 2 sources de tension équivalente, S_{T-eq1} et S_{T-eq2} , et de 2 sources de tension, S_{T1} et S_{T2} .

L'architecture générale d'un VE avec bus continu contrôlé a été établie au paragraphe précédent. Le VE se ramène à un système composé de 2 sources de tension S_{T1} et S_{T2} et d'1 source de tension équivalente S_{T-eq1} (système de traction connecté au bus continu) (Figure 2-46). A partir de cette architecture générale, par symétrie, on obtient l'architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques avec bus continu contrôlé (Figure 2-47). Il faut également noter qu'il a fallu rajouter deux liaisons directes pour considérer les cas où S_{C1} est directement connecté au bus continu de S_{C2} , et vice-versa le cas où S_{C2} est directement connecté au bus continu de S_{C1} .

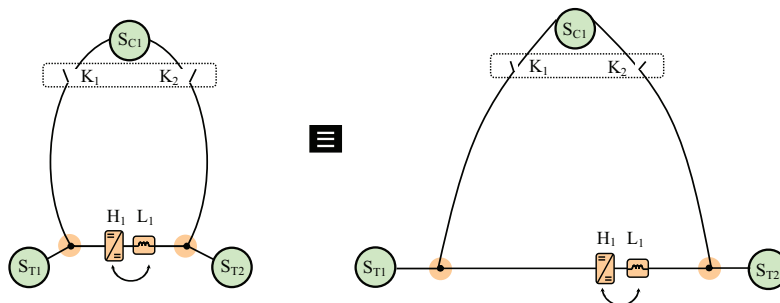


Figure 2-44. Architecture générale d'un VE mixte sans bus continu contrôlé

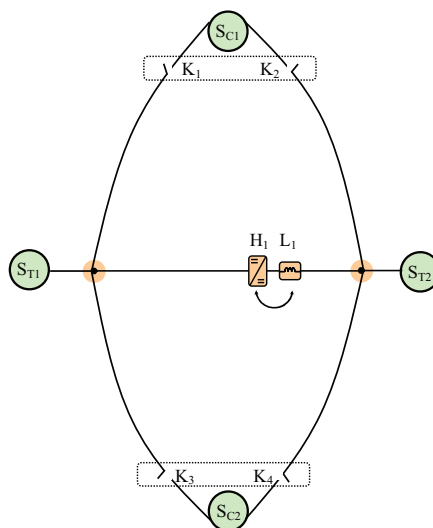


Figure 2-45. Architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques sans bus continu contrôlé

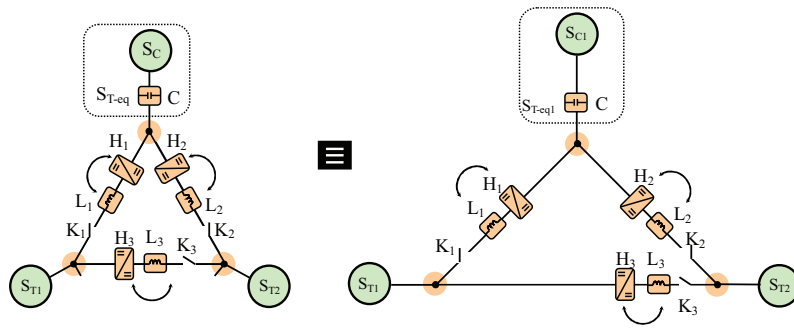


Figure 2-46. Architecture générale d'un VE mixte avec bus continu contrôlé

Les interrupteurs K_1 et K_2 ne peuvent pas être passants ou ouverts en même temps. Il en est de même pour les interrupteurs K_3 et K_4 .

2.2.2.4. Architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques mixte

Pour obtenir l'architecture d'un véhicule mixte à 4 sources électriques, il suffit de superposer l'architecture générale sans bus continu et avec bus continu contrôlé de ce véhicule (Figure 2-48). A partir de cette architecture pour retrouver chaque architecture particulière, on fait l'hypothèse qu'un convertisseur toujours passant est équivalent à un fil. De plus, parmi les interrupteurs K_1, K_2, K_3 et K_4 , un seul interrupteur ne peut être fermé à la fois. Il en est de même pour les interrupteurs K_5, K_6, K_7 et K_8 . L'architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques ramené à 2 sources de tension, S_{T1} et S_{T2} , et 2 sources de courant, S_{C1} et S_{C2} , nécessite 6 convertisseurs, 8 éléments passifs, parmi lesquels on trouve deux condensateurs qui assurent les 2 bus continu et 6 inductances de lissage (Figure 2-49), ainsi que 15 interrupteurs parmi lesquels les interrupteurs K_1, K_2, K_3 et K_4 sont interdépendants ainsi que les interrupteurs K_5, K_6, K_7 et K_8 .

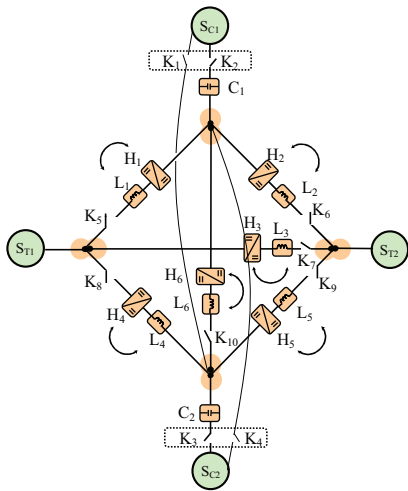


Figure 2-47. Architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques avec bus continu contrôlé

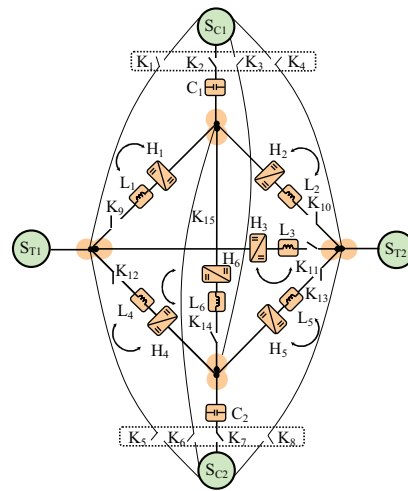


Figure 2-48. Architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques

Il est important de noter que cette architecture générale peut également être utilisée pour un VE mixte routier ou guidé où la traction est assurée par 3 sources électriques, parmi lesquels, 2 constitueraient les sources de tensions S_{T1} et S_{T2} (batteries, supercondensateurs ou système PAC) et 1 la source de courant S_{C2} (caténaire, rail d'alimentation, inductances supraconductrices, système à volant d'inertie ou système à air comprimée). Le système de traction constituerait la source de courant S_{C1} .

2.2.3. Modélisation de l'architecture générale

La REM générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques est donnée Figure 2-50. A partir de cette REM, on peut retrouver la REM particulière de l'ensemble des architectures envisageables pour ce véhicule. Les interrupteurs interdépendants sont modélisés par des aiguilleurs et les interrupteurs indépendants par des éléments de conversion électrique / électrique. Les éléments de la REM (inductances, hacheurs, aiguilleurs, condensateurs,..) ont été détaillés dans la première partie de ce chapitre (cf. § 2.1.3.)

Pour notre étude, toutes les architectures ne sont pas intéressantes. En supposant que S_{T2} est constitué de supercondensateurs et que S_{C2} est le système de traction du véhicule, on fait les mêmes simplifications que pour l'architecture générale d'un VE (cf. § 3.1.3.2.).

On choisit également de placer l'inductance L_6 coté S_{C1} . En supposant que S_{C2} est le système de traction, on supprime la liaison directe entre S_{C1} et le bus continu de S_{C2} , on privilégiera plutôt le bus continu du système de traction avec la liaison directe entre S_{C1} et le bus continu de S_{C2} (Figure 2-51, Figure 2-52).

2.2.4. Applications de la méthodologie de modélisation

La méthodologie de modélisation développée précédemment va être appliquée à une voiture électrique hybride mixte de type série et à un métro électrique mixte à 4 sources électriques.

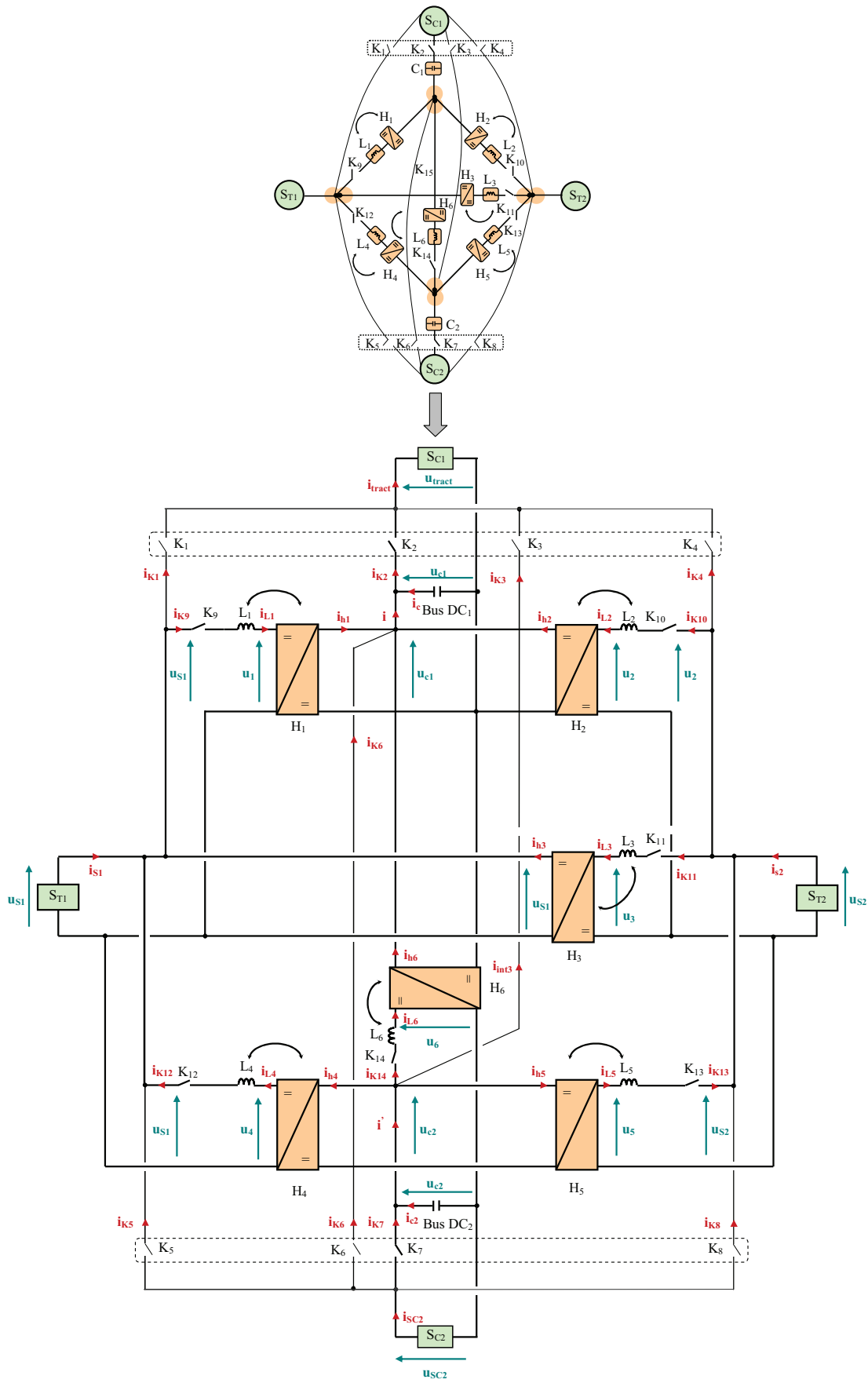


Figure 2-49. Architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques

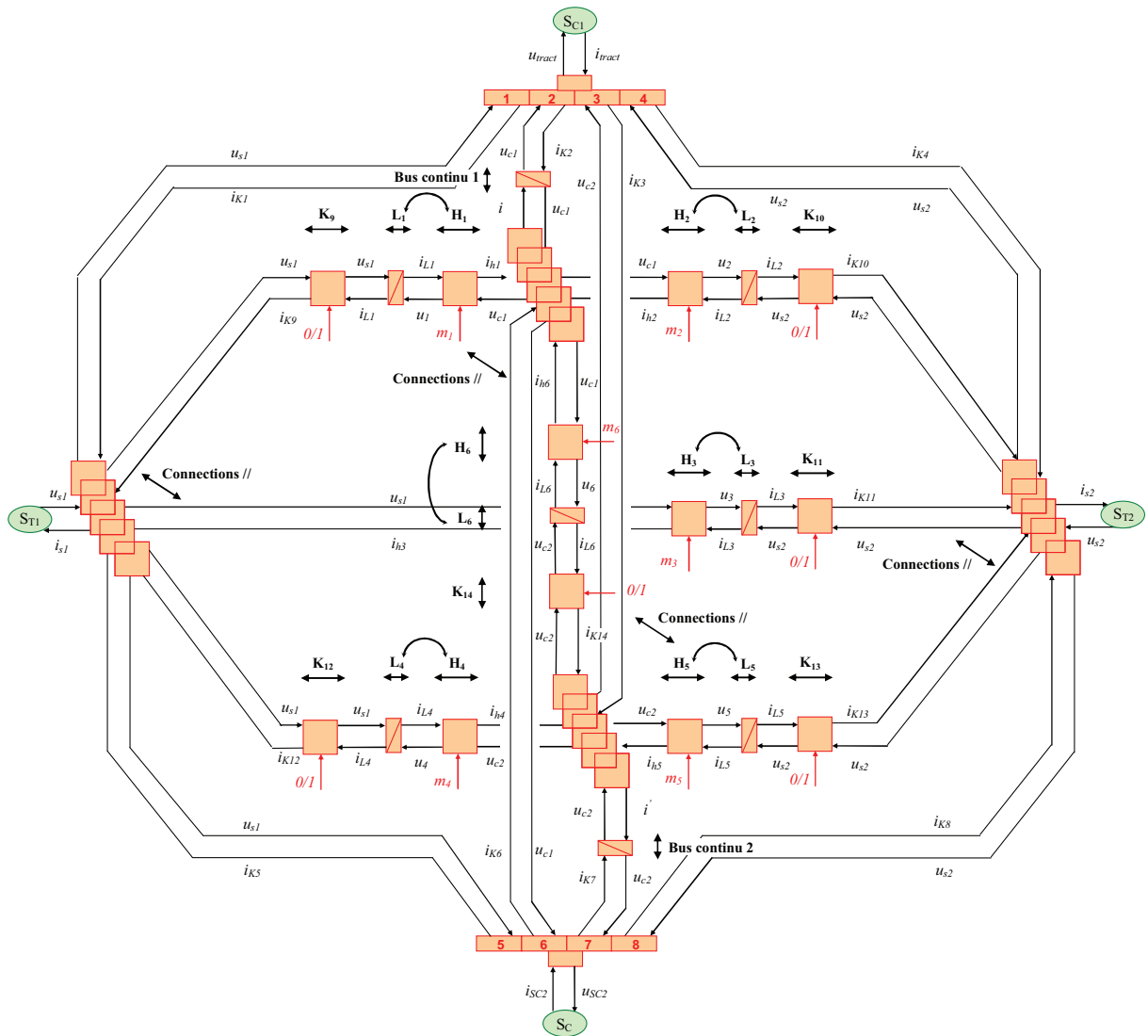


Figure 2-50. REM de l'architecture générale d'un véhicule mixte à 4 sources électriques

2.2.4.1. Application à une voiture électrique hybride mixte

❖ *Système étudié*

Le véhicule considéré est une voiture électrique hybride mixte batteries / supercondensateur. L'architecture du VEH est de type série. Les batteries Ni-MH constituent la source de tension S_{T1} , les supercondensateurs Batscap du L2EP la source de tension S_{T2} et le système de traction, la source de courant S_{C1} et le groupe électrogène, la source de courant S_{C2} (Figure 2-53). L'association des batteries et supercondensateurs est une association active avec contrôle du bus continu et convertisseurs mis en parallèle. Le groupe électrogène est connecté au bus continu.

❖ *Modélisation*

Tous les éléments du véhicule, hormis le groupe électrogène, ont été modélisés au paragraphe 2.1.3. Les paramètres du véhicule sont ceux donnés pour la voiture électrique mixte présentée au chapitre 2 (cf. § 2.1.4.1.)

Le groupe électrogène du véhicule étudié se compose d'un onduleur, une génératrice électrique, un moteur thermique et un réservoir rempli de carburant (Figure 2-54).

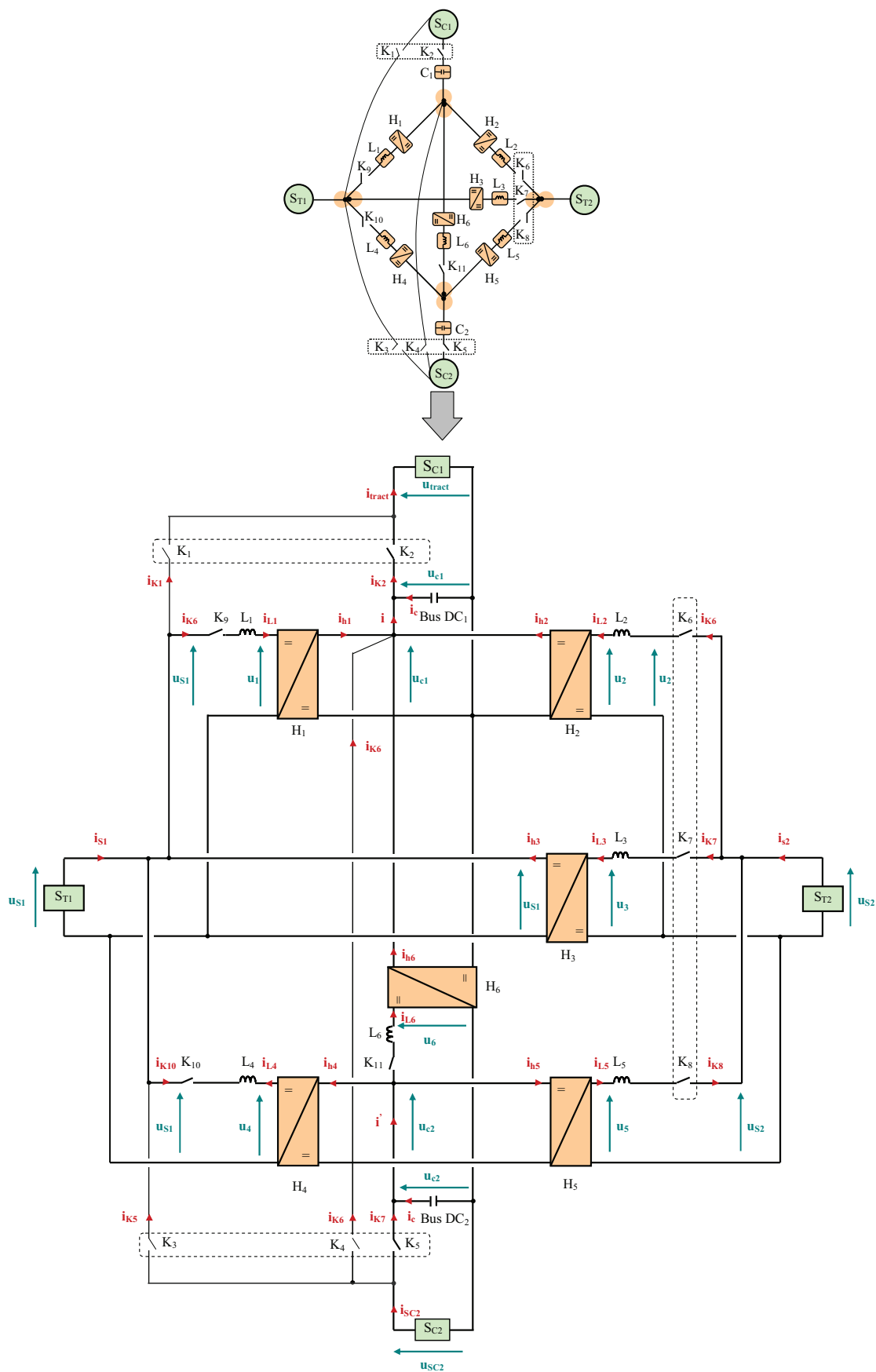


Figure 2-51. Architecture générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 sources électriques

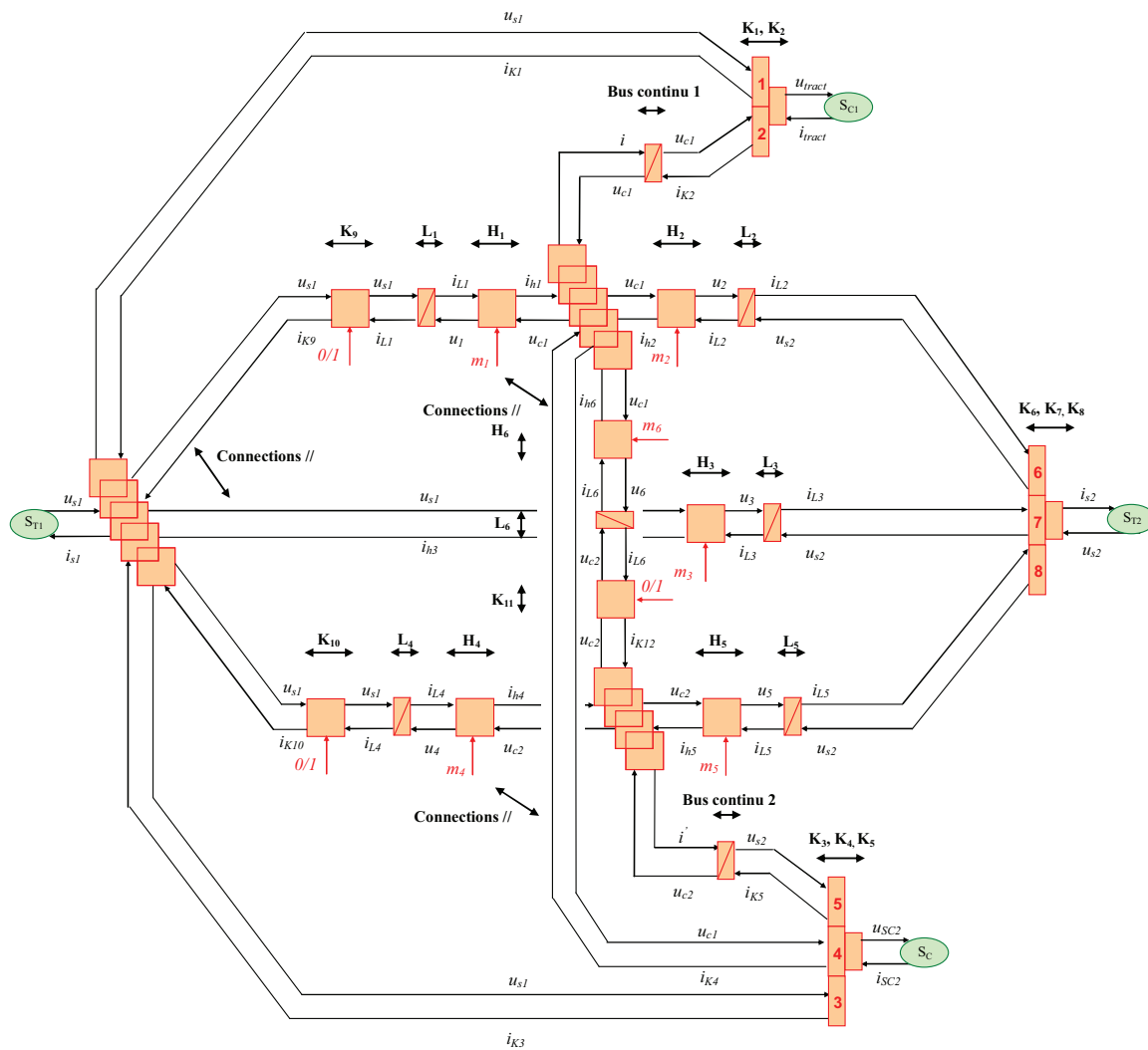


Figure 2-52. REM de l'architecture générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 sources électriques

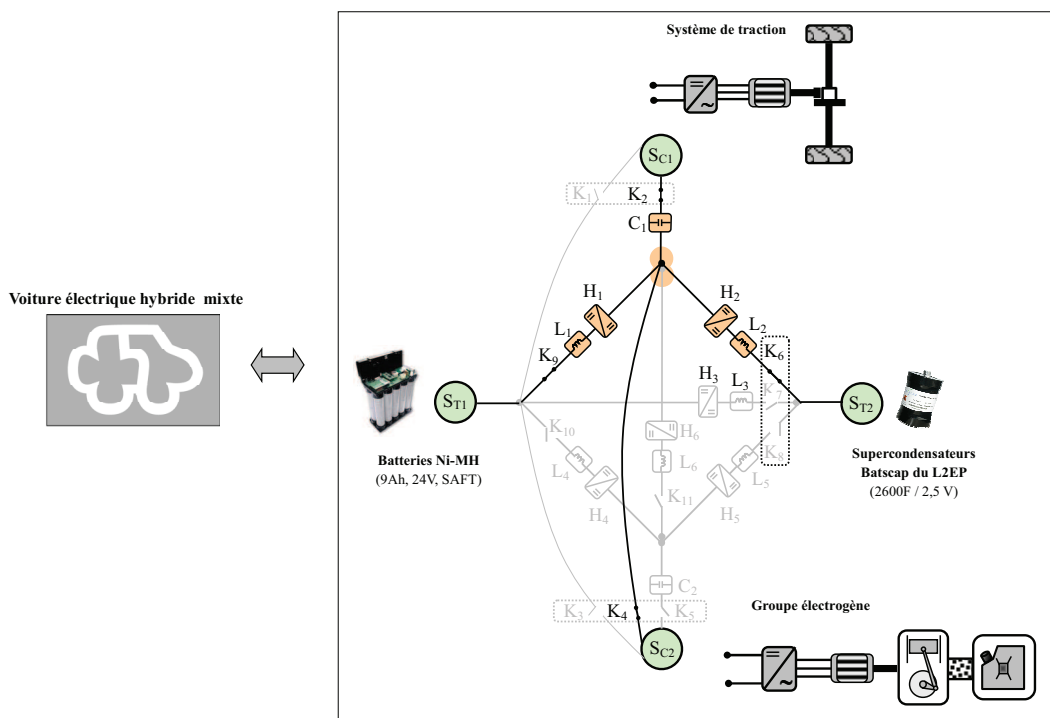


Figure 2-53. Voiture électrique hybride mixte de type série étudiée

Onduleur et machine électrique – En REM, Ils sont représentés par un élément de conversion électrique / mécanique avec pour entrée de réglage, le couple de la génératrice électrique de référence C_{ge_ref} (Figure 2-55). L'onduleur et la génératrice électrique associée sont modélisés avec un modèle quasi-statique (cf. § 2.1.3).

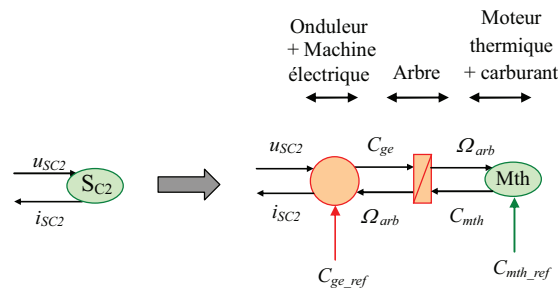
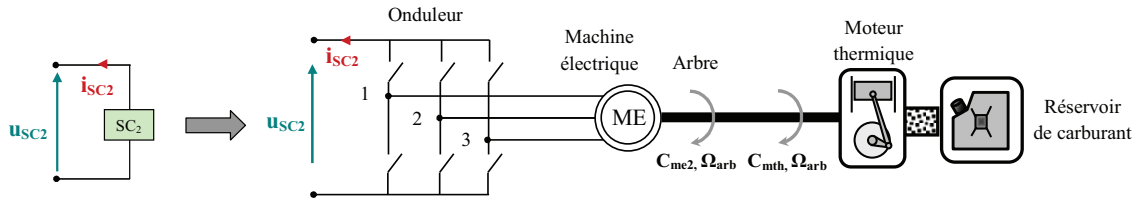


Figure 2-55. REM du groupe électrogène

Arbre – Il permet de connecter mécaniquement la machine électrique au moteur thermique. En REM, il est représenté par un élément d'accumulation où la vitesse de rotation Ω_{arb} est la variable d'état et donc la sortie de l'élément. Il est modélisé par l'équation différentielle suivante :

$$J_{arb} \frac{d}{dt} \Omega_{arb} = C_{mth} - C_{ge} \tag{26}$$

Où J_{arb} est l'inertie de l'arbre.

Moteur thermique et carburant – Le moteur thermique permet de transformer l'énergie chimique contenue dans le carburant en énergie mécanique. La voiture est équipée d'un moteur thermique qui développe une puissance optimale de 10 kW. En REM, l'ensemble moteur thermique et carburant est représenté par une source mécanique avec pour entrée de réglage, le couple du moteur thermique de référence C_{mth_ref} . Le modèle utilisé est un modèle statique.

❖ *Obtention de la REM du système à partir de la REM générale*

L'architecture du véhicule étudié peut être obtenue à partir de l'architecture générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 sources électriques si les interrupteurs K_2, K_4, K_6 et K_9 sont fermés et les interrupteurs $K_1, K_3, K_5, K_7, K_8, K_{10}$ et K_{11} ouverts (Figure 2-56).

De même, la REM du véhicule étudié peut être obtenue à partir de la REM générale si les voies 2, 4 et 6 des aiguilleurs sont activées, l'interrupteur K_9 fermé (commande à 1) et les interrupteurs K_{10} et K_{11} ouverts (commande à 0) (Figure 2-57).

Il est important de noter que l'architecture du véhicule étudié et sa REM auraient également pu être déduite de l'architecture générale sans simplifications et la REM de cette architecture générale (cf. Figure 2-49, Figure 2-50).

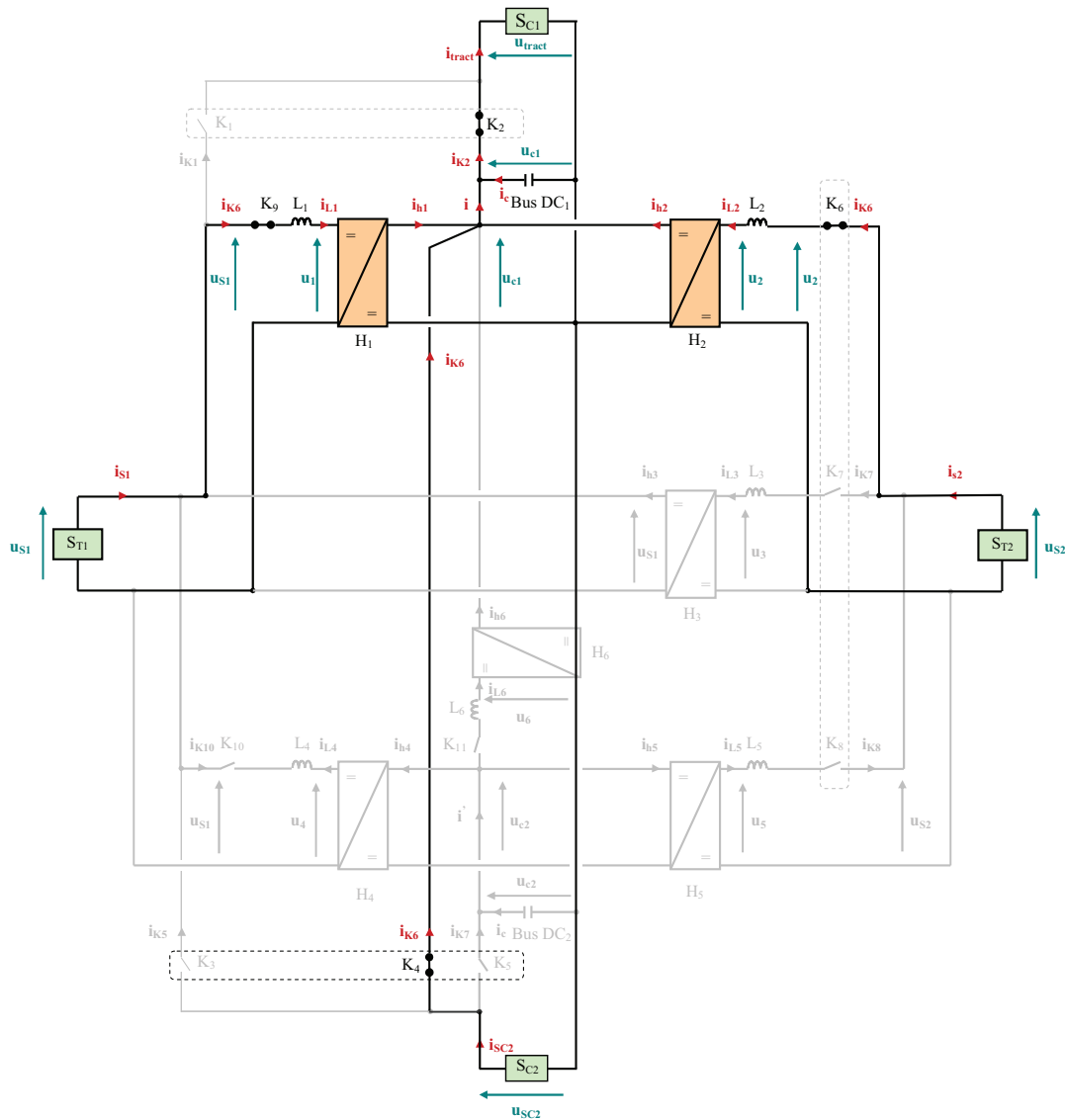


Figure 2-56. Architecture de la voiture électrique hybride mixte étudiée

2.2.4.2. Application à un métro électrique mixte

❖ *Système étudié*

Le véhicule considéré est un métro électrique mixte. Ce véhicule a été étudié dans le cadre d'une collaboration entre le L2EP et Siemens Transportation System (STS) sur « l'étude du système d'alimentation embarquée avec supercondensateurs du futur Neoval » [ALLEGRE 07]. L'idée ici consiste à appliquer la méthodologie développée à ce système complexe.

Entre deux stations, le métro est autonome en énergie grâce à un banc de supercondensateurs embarqué ; en même temps, un système connecté au réseau recharge un banc de supercondensateurs en station (Figure 2-58.a) [ALLEGRE 10c]. Quand le métro est en station le banc de supercondensateurs embarqué est rechargé par le banc de supercondensateurs en station via le rail d'alimentation (Figure 2-58.b). Quand le métro quitte la station, le banc de supercondensateurs en station ainsi que le système connecté au réseau fournissent l'énergie nécessaire à la traction du véhicule et ce tant que le métro roule sur le rail d'alimentation (Figure 2-58.c).

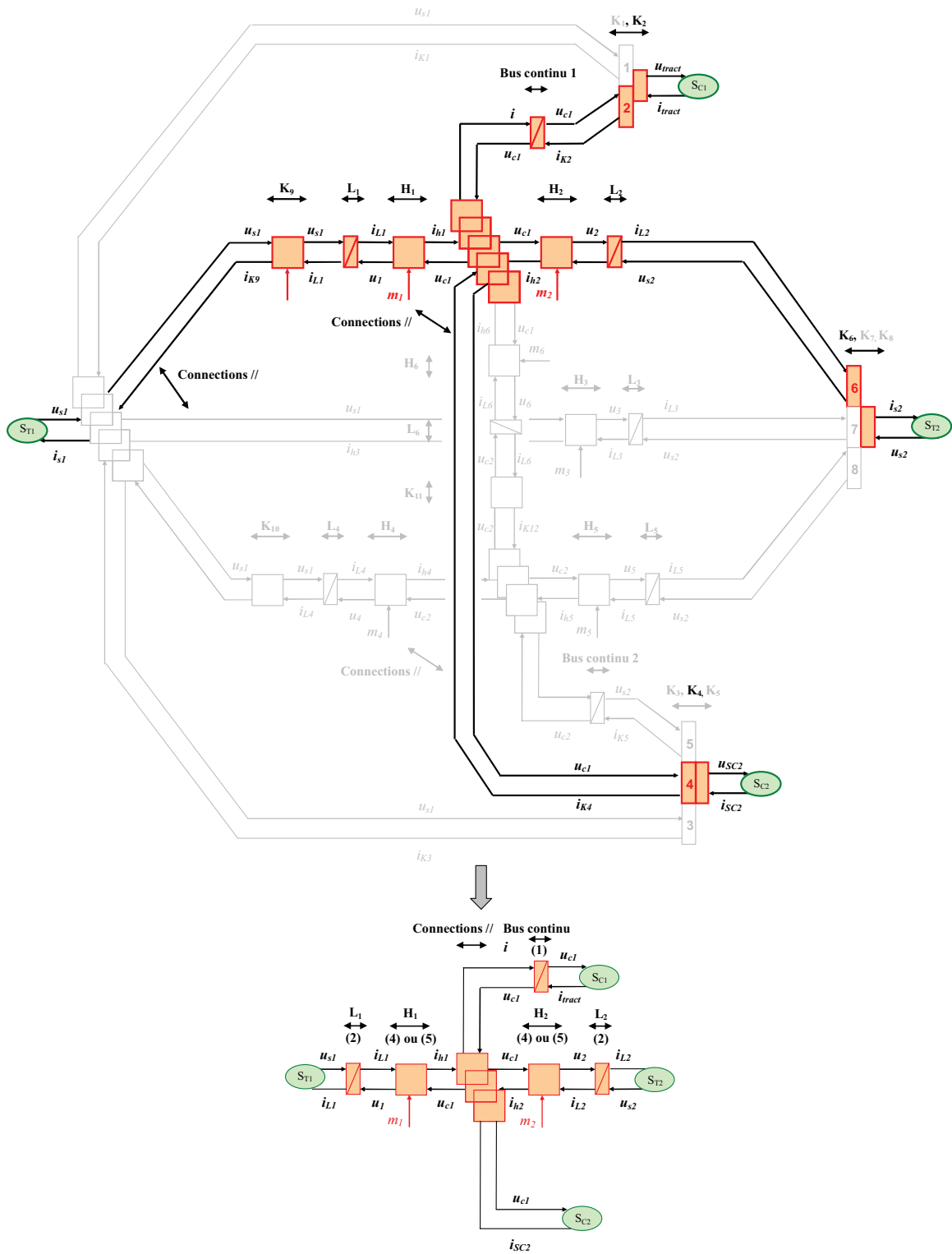


Figure 2-57. REM de la voiture électrique hybride étudié

Lorsque le métro quitte le rail d'alimentation, les supercondensateurs embarqués prennent le relais jusqu'à la station suivante (Figure 2-58.a). En réalité, le système est composé de deux bus continus : un bus continu en station connecté au système réseau et au hacheur des supercondensateurs en station et un bus continu embarqué connecté au hacheur des supercondensateurs embarqués et au système de traction (Figure 2-59).

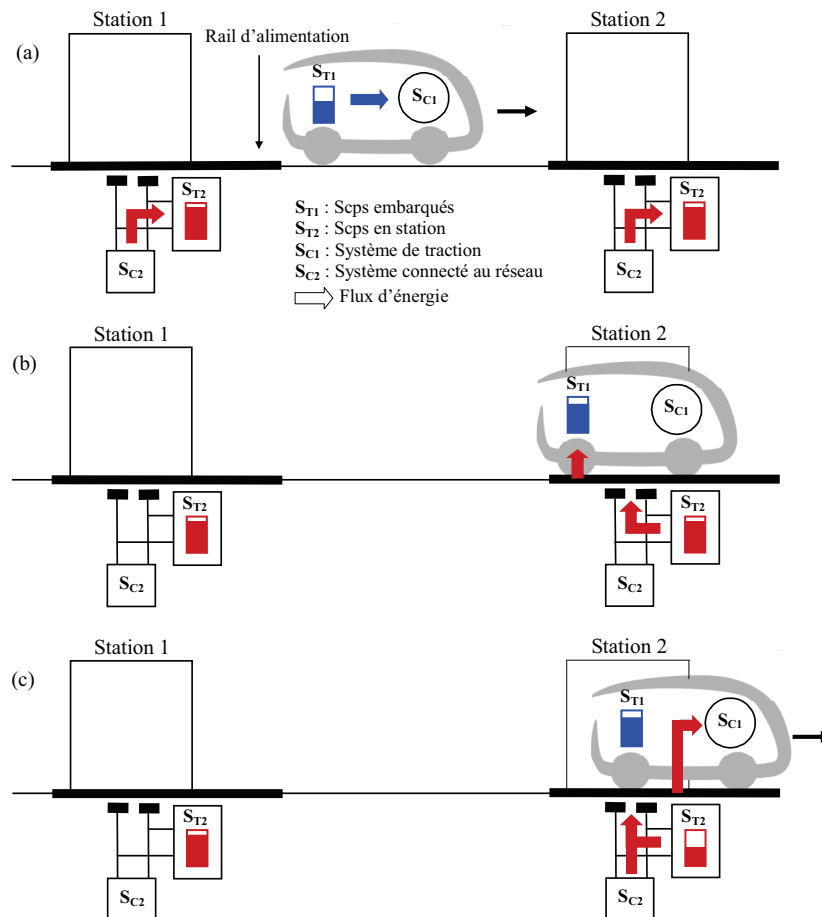


Figure 2-58. Principe du métro électrique mixte

Lorsque le métro arrive en station, un système d'interface va permettre de mettre à la même tension le bus continu embarqué et en station. A ce moment là, d'un point de vue fonctionnel, on ne dispose plus que d'un seul bus continu, résultat de la concaténation des deux bus continus. Afin de simplifier l'étude, nous ne considérerons ici qu'un seul bus continu que le métro soit en station ou entre deux stations.

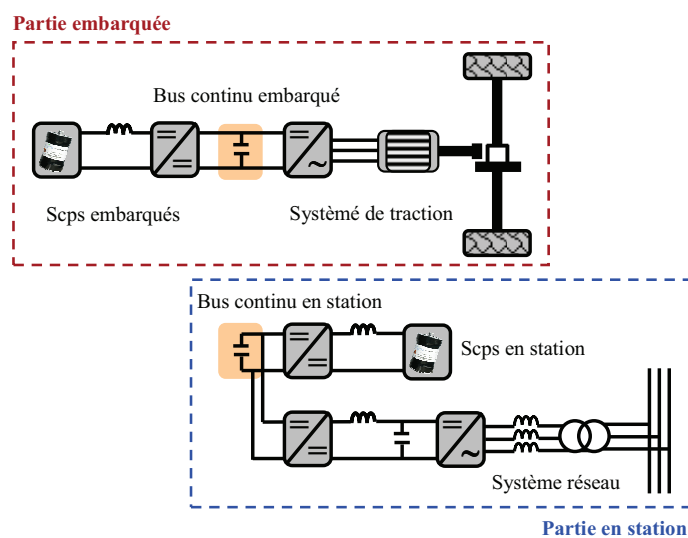


Figure 2-59. Partie en station et partie embarquée du métro

Le métro étudié peut se ramener à un système composé de 4 sources électriques. Les supercondensateurs embarqués constituent la source de tension $ST1$, les supercondensateurs en station, la source de tension $ST2$, le système de traction, la source de courant $SC1$ et le système connecté au réseau, la source de courant $SC2$ (Figure 2-60). Les supercondensateurs sont les supercondensateurs Batscap du L2EP.

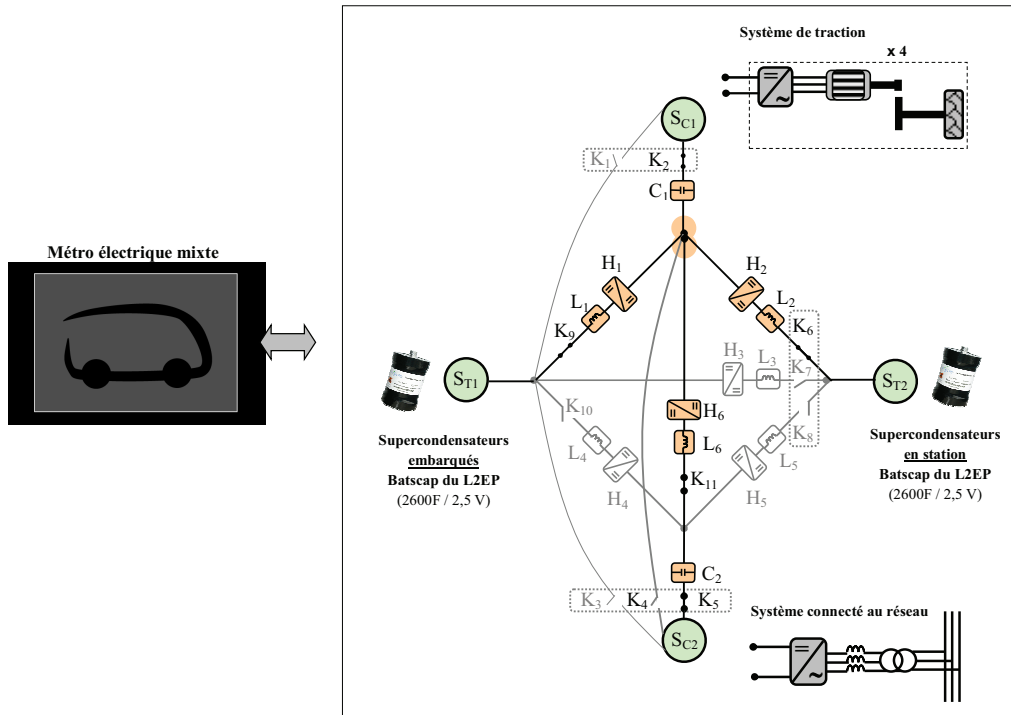


Figure 2-60. Métro électrique mixte étudié

Il est important de noter que la structure du système étudié est un peu différente du système initial pour lequel il n'y a pas de hacheur entre le système réseau et le bus continu [ALLEGRE 07].

❖ *Modélisation*

Les modélisations des supercondensateurs, des inductances, des condensateurs et des hacheurs ont été détaillées § 2.1.3. Le système de traction se compose de 4 onduleurs et quatre moteurs-roues. Sa REM est identique à celle développée § 2.1.3 si l'on ramène le système à un onduleur et un moteur-roue équivalents. Le système connecté au réseau se compose d'un redresseur à diodes, d'inductances de lignes, d'un transformateur connecté au réseau et est modélisé par une source électrique équivalente.

❖ *Obtention de la REM du système à partir de la REM générale*

L'architecture du véhicule étudié peut être retrouvée à partir de l'architecture générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 sources électriques si les interrupteurs K_2, K_5, K_6, K_9 et K_{11} sont fermés et les interrupteurs K_1, K_3, K_4, K_7, K_8 et K_{10} ouverts.

De même, la REM du véhicule étudié peut être obtenue à partir de la REM de l'architecture générale si les voies 2, 5 et 6 des aiguilleurs sont activées, les interrupteurs K_9 et K_{11} fermés (commande à 1) et l'interrupteur K_{10} ouvert (commande à 0) (Figure 2-62).

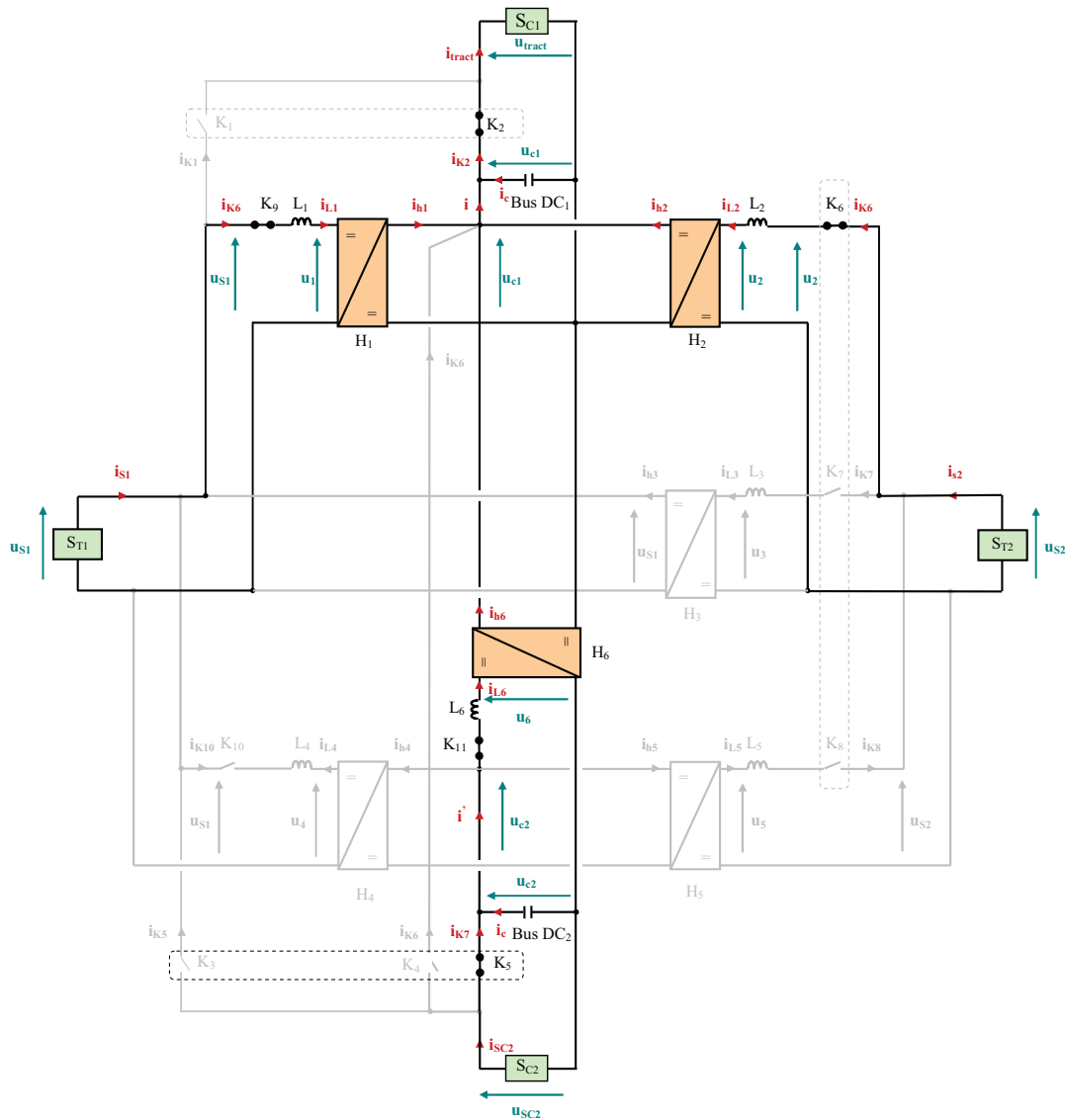


Figure 2-61. Architecture du métro électrique mixte

2.3. Conclusions

Une méthodologie de modélisation a été développée pour des VEs mixtes à 3 sources électriques. Deux sources assurent la traction du véhicule (batteries, supercondensateurs...) et la troisième source est constituée du système de traction du véhicule.

Une architecture et une REM générales, capables de décrire l'ensemble des VEs mixtes à 3 sources électriques, ont été établies. La REM générale permet de mieux analyser le système, de simuler l'ensemble des architectures avec un seul et même programme, et ainsi de comparer facilement plusieurs architectures pour un même véhicule. L'architecture générale pourrait permettre de tester différentes architectures sur une même plateforme expérimentale.

La méthodologie de modélisation a été étendue à des véhicules mixtes à 4 sources électriques, et pourrait être développée de façon plus générale à des véhicules mixtes à N sources électriques.

La méthodologie de modélisation a été appliquée, en particulier, à deux VEs mixtes ayant des architectures différentes, une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte, puis a été étendue à un VEH mixte de type série et à un métro électrique mixte à 4 sources électriques.

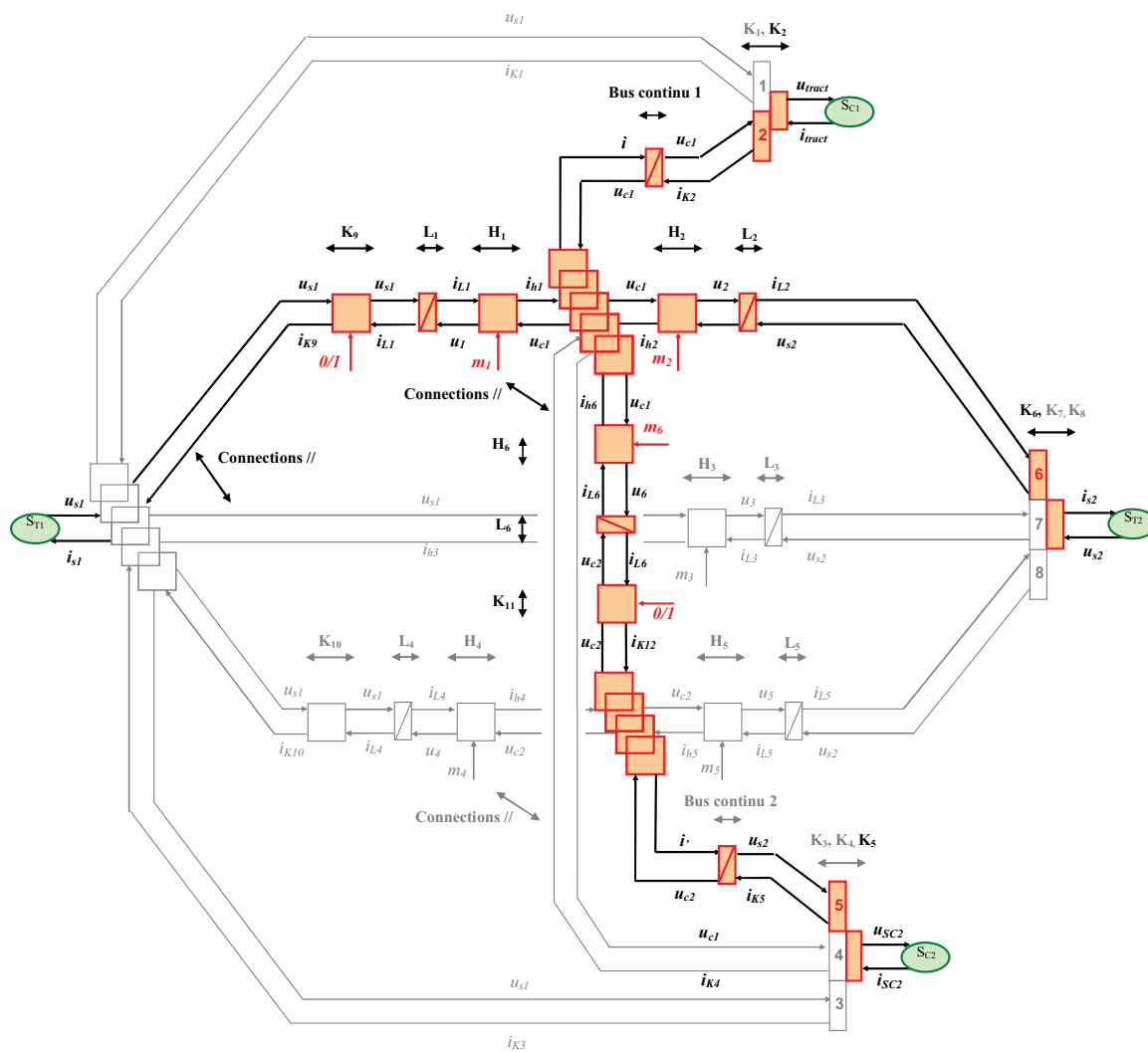


Figure 2-62. REM du métro électrique mixte étudié

3

Commande de VEs et de VEHs mixtes

Une méthodologie de modélisation de VEs mixte à 3 sources électriques a été développée et a été étendue à des véhicules mixtes à 4 sources électriques (VEH mixtes, VEs mixtes). L'objectif de ce chapitre consiste à structurer la commande de VEs mixtes et de VEHs mixtes. Dans cette perspective, les structures de commande des véhicules pris comme exemples d'application dans le chapitre 2 vont être élaborées et seront validées en utilisant des stratégies de gestion de l'énergie simples. Des stratégies plus complexes seront proposées au chapitre suivant pour les VEs mixtes. La première partie s'intéresse à la commande de deux VEs mixte à 3 sources électriques : une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte. Les structures de commande seront validées en simulation, et en temps réel à échelle réduite pour la voiture électrique mixte et sur le véhicule réel pour le microbus électrique mixte. La deuxième partie de ce chapitre porte sur la commande de deux véhicules mixtes à 4 sources électriques : une voiture électrique hybride mixte et un métro électrique mixte à 4 sources électriques. Pour le premier véhicule, la commande est étendue à un véhicule mixte 4 sources électriques et sera validée par simulation. La particularité du second véhicule est que 2 de ses sources électriques sont embarquées et les 2 autres stationnaires. La commande sera donc étendue à ce type de véhicule, validée par simulation et partiellement en temps réel.

3.1. Commande de VEs mixtes à 3 sources électriques

L'objectif de cette partie est d'établir et valider la commande de deux véhicules électriques mixtes à 3 sources électriques : une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte.

3.1.1. Cadre de l'étude

❖ *Approche*

Une architecture générale de VEs mixtes à 3 sources électriques et sa REM, ont été mises en œuvre au chapitre 2. A partir de cette REM générale, les REMs particulières de deux VEs mixtes, une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte, ont été obtenues. Leur analyse va nous permettre de construire la structure de commande de chacun des deux véhicules (Figure 3-1). Ces commandes seront appliquées à la REM générale de VEs mixte. Pour le premier véhicule, la commande sera validée en simulation, et en temps réel en utilisant une simulation HIL à échelle réduite. Pour le second véhicule, la commande sera validée en simulation, et temps réel sur le véhicule réel. La stratégie de gestion de l'énergie utilisée pour les deux applications sera simple. D'autres stratégies de gestion de l'énergie seront développées au chapitre 4.

L'approche aurait pu être différente ; on aurait pu, en effet, partir du cas général pour aller vers les cas particuliers. A ce moment là, il aurait fallu construire une structure de commande générale à partir de la REM générale de VE mixte à 3 sources électriques, et en déduire les structures de commande particulières des deux véhicules étudiés. L'intérêt d'une structure de commande générale est, qu'avec un même programme de simulation, l'ensemble des architectures possibles d'un VE mixte peut être commandé. Cependant, nous n'avons pas choisi cette approche car elle nécessite des temps de calcul importants et par conséquent, est difficile à implanter en simulation et surtout en temps réel. De plus, la construction d'une structure de commande générale nécessite de considérer l'ensemble des cas de commande possibles pour la REM générale et peut s'avérer rapidement très complexe.

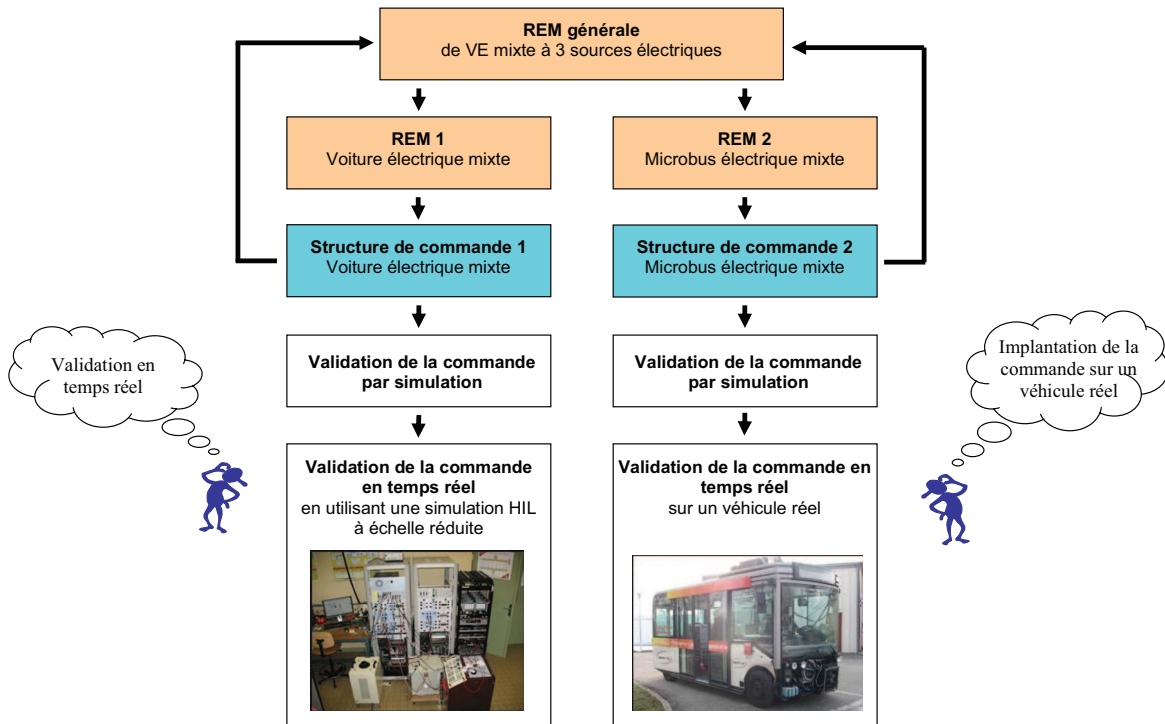


Figure 3-1. Approche

❖ *Construction d’une structure de commande*

La structure de commande d’un système, est obtenue de manière systématique à partir de la REM du système étudié, après avoir réalisé différentes étapes.

L’analyse du système et de sa REM permet de définir les objectifs de commande et les contraintes. Un objectif de commande peut directement être une variable locale que l’on souhaite contrôler et, qui a l’avantage d’être visible dans la REM du système. Par exemple si l’on souhaite maintenir constante la tension du bus continu du système, la variable locale à contrôler est la tension u_c . Un objectif peut également être une variable plus globale que l’on souhaite contrôler, qui n’est alors pas visible dans la REM du système. L’objectif peut être par exemple de gérer la puissance de traction du système P_{tract} . A ce moment là, c’est le réglage d’une (ou de plusieurs) variable locale, pour notre exemple le courant de traction i_{tract} , qui va permettre d’atteindre cet objectif global. Une contrainte est une variable qu’il est nécessaire de contrôler pour atteindre un objectif.

A partir des objectifs et des contraintes, les chaînes de réglages du système sont établies, et relient les entrées de réglages aux variables que l’on souhaite contrôler. Ces chaînes de réglage sont ensuite inversées, en supposant que l’ensemble des variables est mesurable. Par exemple, l’inversion d’un élément d’accumulation nécessite un correcteur et des mesures. Les éléments de couplage sont inversés en utilisant un critère de répartition, qui permet de répartir l’énergie. Les autres éléments, comme les éléments de conversion, sont directement inversés sans utiliser de correcteur. Des simplifications de la structure de commande et des estimations de variables non mesurables peuvent être envisagées. La structure de commande obtenue est implantable sur un système réel et met en évidence les capteurs nécessaires [BOUSCAYROL 03]. Finalement, une stratégie de gestion de l’énergie est définie pour gérer l’ensemble du système.

Généralement les travaux concernant la commande de véhicules mixte batteries / supercondensateurs ne font pas la distinction entre structure de commande et stratégie de gestion de l’énergie et se focalisent surtout sur la stratégie [GAO 03], [MORENO 06], [AWERBUCH 08]. Un point fort de la méthodologie de commande que nous allons utiliser est qu’elle fait cette distinction et permet une meilleure analyse du système.

❖ *Contrôle du bus continu*

Deux applications sont traitées par la suite. Pour la voiture électrique mixte, l'alternance des sources nécessite l'utilisation un bus continu sur lequel est connecté le système de traction ainsi que les hacheurs, des batteries et des supercondensateurs. Le condensateur qui compose ce bus continu peut se charger / décharger très vite et doit être contrôlé pour deux principales raisons. La première raison est que la tension du bus continu ne doit pas dépasser sa valeur maximale pour ne pas l'endommager. La deuxième raison est que la tension du bus continu doit être suffisante pour assurer la traction du véhicule pour l'ensemble de ses points de fonctionnement, et pour que les convertisseurs statiques connectés au bus puissent fonctionner correctement.

Pour la plupart des applications de traction, le bus continu est contrôlé et maintenu constant. Il existe cependant des applications où le bus continu est contrôlé mais peut varier sur différentes plages de tension. On peut citer comme exemple, la Toyota Prius II pour laquelle la tension du bus continu augmente avec la vitesse du véhicule [OLSZEWSKY 06]. Pour le microbus électrique hybride, les batteries sont directement connectées au système de traction et font office de bus continu. Pour ce système, la tension d'entrée du système de traction ne nécessite pas d'être contrôlée car les batteries ont des dynamiques lentes et leur tension varie peu.

3.1.2. Commande d'une voiture électrique mixte

L'objectif de cette partie vise à élaborer la structure de commande d'une voiture électrique mixte. Cette structure de commande sera validée en simulation puis en temps réel en utilisant une simulation HIL à échelle réduite.

3.1.2.1. Système étudié

Le véhicule étudié est la voiture électrique mixte présentée au chapitre 2 (cf. § 2.1.4.1). L'architecture et la REM de ce véhicule ont été obtenues respectivement à partir de l'architecture générale simplifiée d'un VE mixte et de sa REM (Figure 3-2, Figure 3-3).

3.1.2.2. Commande du SSE électrique mixte

Nous nous intéressons ici à la commande du Système Stockage d'Énergie (SSE) électrique mixte batteries / supercondensateurs. L'analyse du système et de sa REM va nous permettre de définir ses objectifs de commande et d'élaborer sa structure de commande.

❖ *Chaîne de réglage*

Le véhicule étudié dispose d'un bus continu connecté à son système de traction, et de 2 sources électriques, constituées de batteries et de supercondensateurs, pour assurer sa traction.

Les objectifs de commande du SSE électrique mixte sont les suivants :

- **objectif 1 : contrôler la tension du bus continu u_c** , afin de la maintenir constante quelques soient les flux d'énergie échangés entre les sources électriques.
- **objectif 2 : gérer la puissance de traction**, c'est-à-dire fournir la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule pendant les phases d'accélération, à vitesse constante et absorber la puissance renvoyée par le véhicule pendant les phases de décélération par exemple.

Différentes possibilités sont envisageables pour atteindre ces objectifs. Le bus continu peut être contrôlé soit par les batteries, soit par les supercondensateurs, soit par les deux. Il en est de même pour la gestion de la puissance de traction. Etant donné que le SSE électrique est mixte, nous éliminons les cas où les deux objectifs de commande sont assurés par une seule et même source électrique. L'ensemble des possibilités est rassemblé dans le Tableau 3-1.

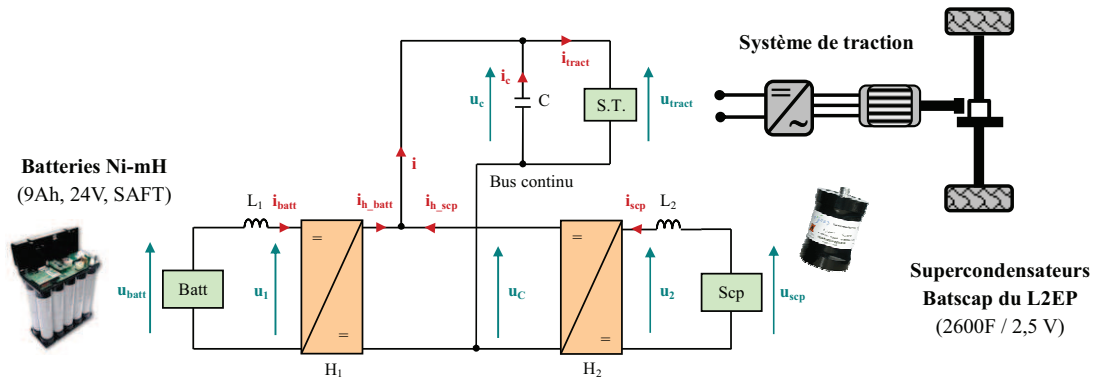


Figure 3-2. Architecture de la voiture électrique mixte étudiée

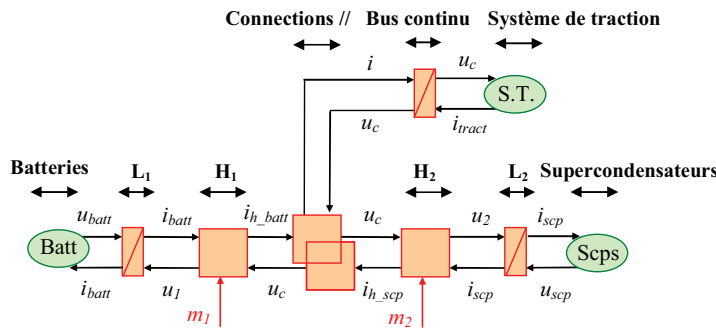


Figure 3-3. REM de la voiture électrique mixte étudiée

Tableau 3-1- Différentes possibilités de commande du SSE électrique

Possibilités de commande	Objectif 1 : Contrôler la tension du bus continu	Objectif 2 : Gérer la puissance de traction
Cas 1	Batt et Scps	Batt et Scps
Cas 2	Batt	Scps
Cas 3	Scps	Batt

Batt : Batteries, Scps : Supercondensateurs

Les chaînes de réglage d'un système relient les entrées de réglages aux variables que l'on souhaite contrôler. Pour le cas 1 (cf. Tableau 3-1), la chaîne de réglage relie les fonctions de modulation m_1 et m_2 des hacheurs H_1 et H_2 à la variable u_c (Figure 3-4). Cette chaîne de réglage va permettre de remplir les deux objectifs de commande à la fois. Tout d'abord, cette chaîne de réglage va permettre de contrôler la tension u_c en utilisant les batteries et les supercondensateurs. De plus, le courant i étant fourni également par les batteries et les supercondensateurs, et la tension u_c étant maintenue constante, les batteries fournissent également la puissance de traction (27). Afin d'éviter tout risque d'instabilité due aux dynamiques des l'inductance L_1 et L_2 , il est préférable de contrôler également les courants i_{batt} et i_{scp} qui les traversent [LHOMME 05].

$$P_{tract} = i_{tract} u_c \equiv i u_c \tag{27}$$

Pour les cas 2 et 3 (cf. Tableau 3-1), chaque source est utilisée de façon indépendante pour remplir un objectif, il est donc nécessaire d'avoir deux chaînes de réglage.

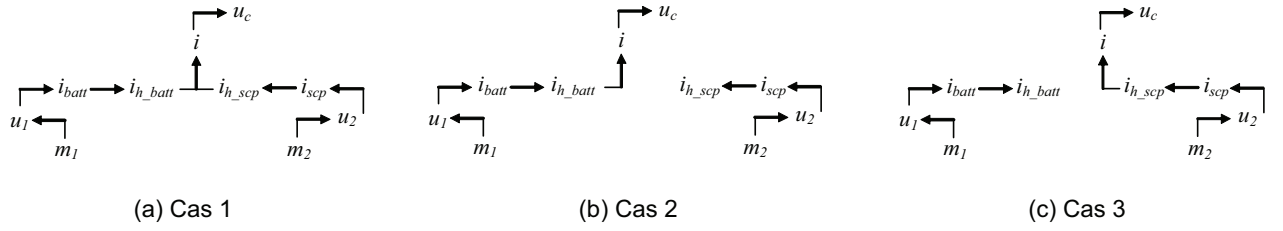


Figure 3-4. Chaînes de réglage possibles pour le SSE électrique mixte

Pour le cas 2, la première chaîne de réglage a pour objectif que les batteries contrôlent à elles seules la tension du bus continu. Elle relie la fonction de modulation m_1 du hacheur H_1 à la variable u_c . Pour que la puissance de traction soit entièrement fournie par les supercondensateurs, étant donné que la tension u_c est maintenu constante, il suffit de contrôler le courant i_{h_scp} et de l'imposer égal au courant de traction mesuré i_{tract_mes} . La deuxième chaîne de réglage relie donc la fonction de modulation m_2 du hacheur H_2 à la variable i_{h2} .

Pour le cas 3, les chaînes de réglage sont les duales de celles du cas 2. La première chaîne de réglage a pour objectif que les supercondensateurs contrôlent à eux seuls la tension de bus continu. Elle relie la fonction de modulation m_2 du hacheur H_2 à la variable u_c . La deuxième chaîne de réglage a pour objectif que les batteries gèrent à elles seules la puissance de traction. Elle relie la fonction de modulation m_1 du hacheur H_1 à la variable i_{h_batt} .

❖ Structure de commande du SSE électrique mixte : cas 1

La structure de commande du cas 1 (Figure 3-5) est obtenue en inversant chaque bloc traversé par sa chaîne de réglage (cf. Figure 3-4.a). Chaque élément de cette structure de commande va être détaillé.

Inversion du bus continu – En REM, Le bus continu est représenté par un élément d'accumulation. Son inversion nécessite un correcteur C_{corr_c} afin de respecter la causalité intégrale, et la compensation du courant de traction mesuré i_{tract_mes} :

$$i_{ref} = C_{corr}(u_{c_ref} - u_{c_mes}) + i_{tract_mes} \quad (28)$$

Il est important de noter que l'inversion d'un élément d'accumulation indique qu'il faut un correcteur mais ne définit pas quel type de correcteur utiliser. Lors de la mise en œuvre de la structure de commande, le choix du correcteur sera déterminé par l'analyse de l'élément à inverser. La synthèse de correcteurs classiquement utilisés est donnée en Annexe F.

Inversion de la connexion parallèle – Les deux courants de référence $i_{h_batt_ref}$ et $i_{h_scp_ref}$ sont définis à partir du courant i_{ref} . L'inversion de la connexion parallèle nécessite donc l'introduction d'un coefficient de distribution k_d (29). Ce degré de liberté supplémentaire va permettre de distribuer la puissance, à fournir ou à absorber, entre les batteries et les supercondensateurs pour maintenir la tension du bus continu constante et assurer la traction du véhicule. Quand $k_d = 0$, cette puissance est entièrement fournie ou absorbée par les batteries. Quand $k_d = 1$, cette puissance est entièrement fournie ou absorbée par les supercondensateurs. Enfin lorsque k_d évolue entre 0 et 1, cette puissance est partagée entre les batteries et les supercondensateurs.

$$\begin{cases} i_{h_batt_ref} = k_d i_{ref} \\ i_{h_scp_ref} = (1 - k_d) i_{ref} \end{cases} \quad \text{avec } 0 < k_d < 1 \quad (29)$$

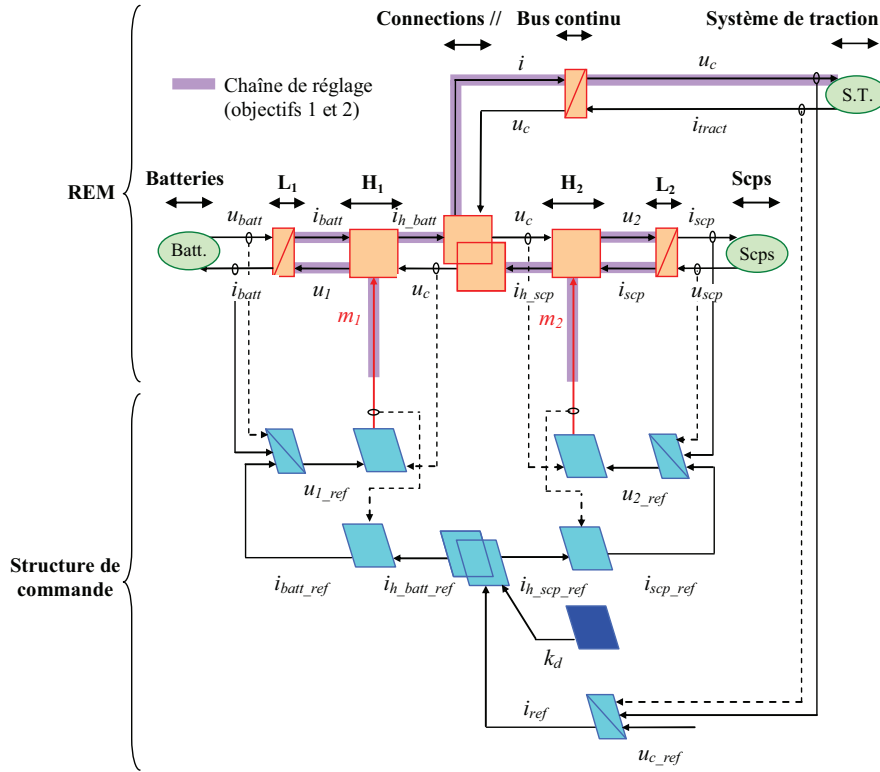


Figure 3-5. Structure de commande du SSE électrique mixte pour le cas 1

Inversion des hacheurs H_1 et H_2 – En REM, les hacheurs sont représentés par des éléments de conversion électrique / électrique. L’inversion de ces éléments est directe. Dans cette étude, les hacheurs sont inversés deux fois afin de contrôler les courants i_{batt} et i_{scp} circulant dans les inductances L_1 et L_2 . La première inversion permet de définir les courants i_{batt} et i_{scp} , et nécessite la mesure des fonctions de modulation m_1 et m_2 (30). Celles-ci sont elles-mêmes définies par la deuxième inversion, qui nécessite la mesure de la tension du bus continu u_{c_mes} (31). Il est important de noter que les fonctions de modulation m_1 et m_2 sont comparées en expérimentation à une porteuse MLI de façon à définir les fonctions de connexion des hacheurs [HAUTIER 99], [DELARUE 03].

$$i_{batt_ref} = \frac{1}{m_1} i_{h_batt_ref} \quad \text{et} \quad i_{scp_ref} = \frac{1}{m_2} i_{h_scp_ref} \quad \text{avec} \quad 0 < m_1 \text{ et } m_2 < 1 \quad (30)$$

$$m_{i_ref} = \frac{u_{i_ref}}{u_c} \quad \text{avec} \quad i \in \{1, 2\} \quad (31)$$

Dans la pratique, les fonctions de modulation m_1 et m_2 sont estimées pour réaliser (30).

Inversion des inductances L_1 et L_2 – En REM, les inductances L_1 et L_2 sont représentées par des éléments d’accumulation. Leurs inversions nécessitent deux correcteurs C_{corr_L1} et C_{corr_L2} et la compensation des tensions mesurées u_{batt_mes} et u_{scp_mes} (32).

$$\begin{cases} u_{1_ref} = -C_{orr_L1}(i_{batt_ref} - i_{batt_mes}) + u_{batt_mes} \\ u_{2_ref} = -C_{orr_L2}(i_{scp_ref} - i_{scp_mes}) + u_{scp_mes} \end{cases} \quad (32)$$

La structure de commande du SSE électrique mixte pour le cas 1 met en œuvre trois correcteurs : deux pour contrôler les courants i_{batt} et i_{scp} , et un pour contrôler la tension du bus continu u_c . De plus, l’introduction d’un coefficient de distribution k_d va permettre contrôler la répartition des flux de puissance entre les batteries et les supercondensateurs (cf. Figure 3-5).

❖ *Structure de commande du SSE électrique mixte : cas 2 et 3*

La structure de commande du cas 2 (Figure 3-6) est obtenue en inversant chaque bloc de ses différentes chaînes de réglage (cf. Figure 3-4.b). La structure de commande du cas 3 est la duale de celle du cas 2 et ne sera pas donnée ici.

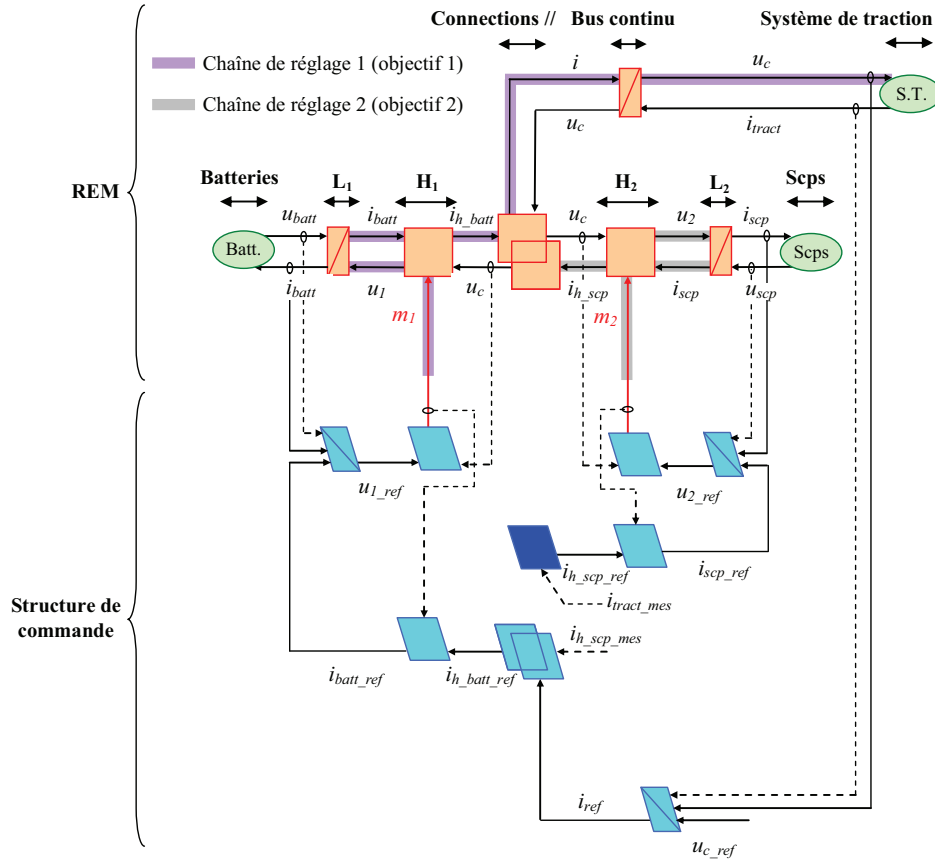


Figure 3-6. Structure de commande du SSE électrique mixte pour le cas 2

Les inversions du bus continu, des hacheurs H_1 et H_2 , et des inductances L_1 et L_2 ont été détaillées précédemment.

Inversion de la connexion parallèle – Pour le cas 2, le contrôle du courant i se fait à l'aide du seul courant i_{h1_ref} . Ainsi, dans l'inversion du couplage électrique, il est nécessaire de compenser le courant i_{h2_mes} en le mesurant, car celui-ci agit comme une entrée de perturbation :

$$\text{Cas 2 : } i_{h_batt_ref} = i_{ref} - i_{h_scp_mes} \quad (33)$$

Pour le cas 3, le contrôle du courant i se fait cette fois-ci à l'aide du seul courant i_{h2_ref} ; le courant i_{h1_mes} agit comme une entrée de perturbation, et doit être compensé :

$$\text{Cas 3 : } i_{h_scp_ref} = i_{ref} - i_{h_batt_mes} \quad (34)$$

Il est également possible de définir les courants de référence $i_{h_batt_ref}$ et $i_{h_scp_ref}$ en introduisant un coefficient de distribution k_d (Figure 3-7.b):

$$\begin{cases} i_{h_batt_ref} = k_d i_{ref} \\ i_{h_scp_ref} = (1 - k_d) i_{ref} \end{cases} \quad \text{avec } 0 < k_d < 1 \quad (35)$$

Pour le cas 2, en fonctionnement normal, afin que les supercondensateurs puissent gérer la puissance de traction, le courant de référence $i_{h_scp_ref}$ est fixé égal au courant de traction mesuré i_{tract_mes} (36).

Cas 2 (en fonctionnement normal) : $i_{h_scp_ref} = i_{tract_mes} \Rightarrow k_d = 1 - \frac{i_{tract_mes}}{i_{ref}}$ (36)

De même pour le cas 3, on aura :

Cas 3 (en fonctionnement normal) : $i_{h_batt_ref} = i_{tract_mes} \Rightarrow k_d = \frac{i_{tract_mes}}{i_{ref}}$ (37)

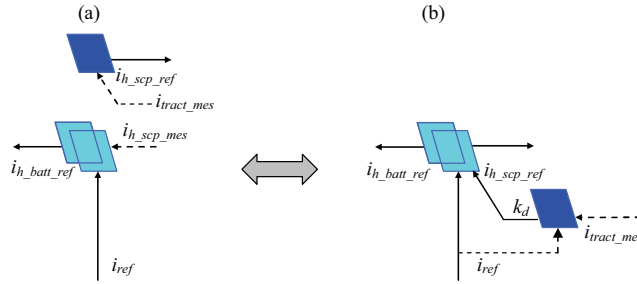


Figure 3-7. Possibilités de détermination des courants de référence $i_{h_scp_ref}$ et $i_{h_batt_ref}$

❖ Structure de commande du SSE électrique mixte (cas 1, 2 et 3)

Il est possible d’avoir une même structure de commande pour le SSE électrique mixte qui prenne à la fois en compte les cas 1, 2 et 3 (Figure 3-8).

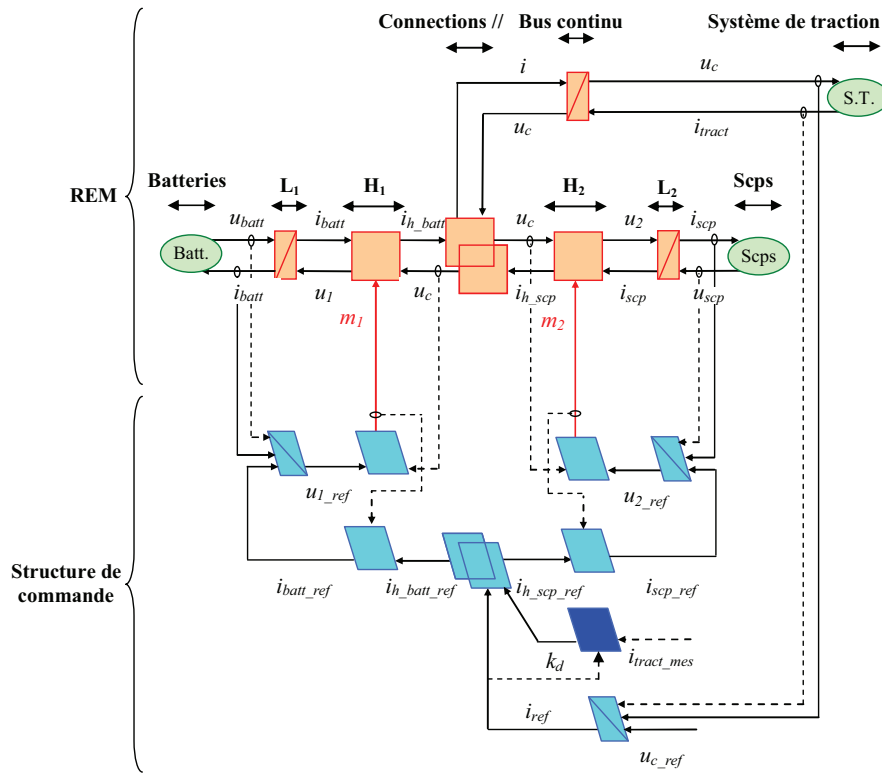


Figure 3-8. Structure de commande du SSE électrique mixte (cas 1, 2 et 3)

Il suffit de superposer les structures de commande des différent cas et de définir les courants de référence $i_{h_batt_ref}$ et $i_{h_scp_ref}$ à l’aide d’un coefficient de distribution k_d différent suivant le cas étudié (cf. (29), (36) et (37)).

3.1.2.3. Commande du système de traction

Nous nous intéressons ici à la commande du système de traction du véhicule. L'analyse du système et de sa REM va nous permettre de définir ses objectifs de commande et d'élaborer sa structure de commande.

❖ Chaîne de réglage

L'objectif de commande du système de traction (**objectif 3**) consiste à **contrôler la vitesse du véhicule**, de façon à ce qu'elle suive le cycle de vitesse de référence. Il est important de noter que cette approche est une approche dite « forward » et utilise un modèle conducteur (ici un correcteur) qui doit suivre un cycle de vitesse donné [CHAN 10]. La chaîne de réglage est classiquement utilisée et relie le couple de la machine électrique de référence C_{me_ref} à la vitesse du véhicule v_{veh} (Figure 3-9) [VERHILLE 07].

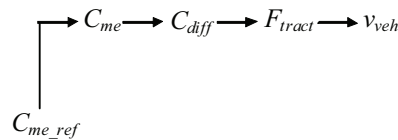


Figure 3-9. Chaîne de réglage du système de traction

❖ Structure de commande du système de traction

La structure de commande du système de traction est obtenue en inversant chaque bloc selon la chaîne de réglage (Figure 3-10). Chaque élément de cette commande va être détaillé.

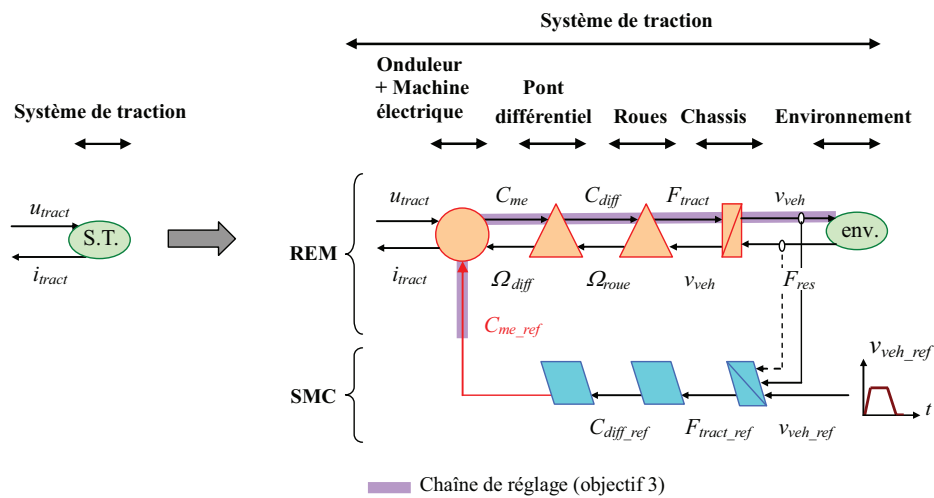


Figure 3-10. Structure de commande du système de traction

Inversion du pont différentiel – En REM, le pont différentiel est représenté par un élément de conversion mécanique. L'inversion de cet élément est directe :

$$C_{me_ref} = \frac{C_{diff_ref}}{k_{diff}} \quad (38)$$

Inversion des roues – En REM, elles sont aussi représentées par un élément de conversion mécanique, dont l'inversion est directe :

$$C_{diff_ref} = F_{tract} R_{roue} \quad (39)$$

Inversion du châssis – En REM, le châssis est représenté par un élément d’accumulation. Son inversion nécessite donc un correcteur C_{corr_v} et la compensation de la force de résistance à l’avancement mesurée F_{res_mes} :

$$F_{tract_ref} = C_{corr_v}(v_{veh_ref} - v_{veh_mes}) + F_{res_mes} \quad (40)$$

3.1.2.4. Application à la REM générale simplifiée d’un VE mixte

La structure de commande développée est appliquée à la REM générale simplifiée d’un VE mixte (Figure 3-11). Afin de retrouver la REM particulière de la voiture électrique mixte étudiée, il faut que les voies 2 et 3 des aiguilleurs (interrupteurs K_2 et K_3 fermés) soient activées et l’interrupteur K_5 fermé.

3.1.2.5. Validation de la commande par simulation

❖ *Stratégie de gestion de l’énergie*

La stratégie de gestion de l’énergie mise en place est simple, pour valider la structure de commande développée. Le principe de cette stratégie sera utilisé dans l’ensemble des stratégies plus élaborées détaillées dans le chapitre 4. La commande utilisée est celle du cas 1 (cf. § 4.1.2.3.).

Pour cette stratégie, que nous appellerons « stratégie avec transition douce », les batteries et les supercondensateurs ne sont quasiment jamais utilisés ensemble. En décharge (phases d’accélération ou à vitesse constante), les supercondensateurs sont utilisés ($k_d = 0$) tant que la tension à leurs bornes, u_{scp} , n’a pas atteint la tension limite $U_{scp_min_limit}$ supérieure à la tension minimale U_{scp_min} . A ce moment là, les batteries vont prendre le relais de façon progressive. Au cours de cette phase de transition douce, les batteries et les supercondensateurs sont utilisés en même temps ($0 < k_d < 1$). Lorsque la tension u_{scp} atteint sa tension minimale U_{scp_min} , le courant i_{scp} est nul et les batteries assurent à elles seules la traction du véhicule ($k_d = 1$) (Figure 3-11). De la même manière, en recharge (phases de décélération), les supercondensateurs sont utilisés tant que la tension u_{scp} n’a pas atteint la tension limite $U_{scp_max_limit}$ inférieure à la tension maximale U_{scp_max} . A ce moment là, les batteries prennent progressivement le relais [ALLEGRE 09].

❖ *Résultats de simulation*

Le système étudié est simulé en transposant sa REM et sa structure de commande sous Matlab-Simulink. La simulation est réalisée sur 2 cycles normalisés urbains ECE. Les caractéristiques du véhicule ont été données au chapitre 2 (cf. § 2.1.4.1). La stratégie de gestion de l’énergie est la « stratégie avec transition douce » développée précédemment, pour laquelle on a fixé les paramètres suivants : $U_{scp_min} = 147 V$, $U_{scp_min_limit} = 149 V$, $U_{scp_max_limit} = 208 V$, $U_{scp_max} = 210 V$. Généralement, le taux de décharge maximal des supercondensateurs est choisi entre 50 et 70% [BARRADE 03]. En effet, en dessous de 50%, leur rendement est mauvais. Pour notre étude, nous avons choisi un taux de décharge maximal de $d_{scp} = 70\%$.

Les correcteurs utilisés sont des correcteurs Proportionnel Intégral (PI). La synthèse de ces correcteurs est effectuée par la méthode de placement de pôle en imposant un dépassement nul (coefficient d’amortissement égal à 1) et en choisissant un temps de réponse en boucle fermé légèrement plus rapide que son temps de réponse en boucle ouverte (cf. Annexe F).

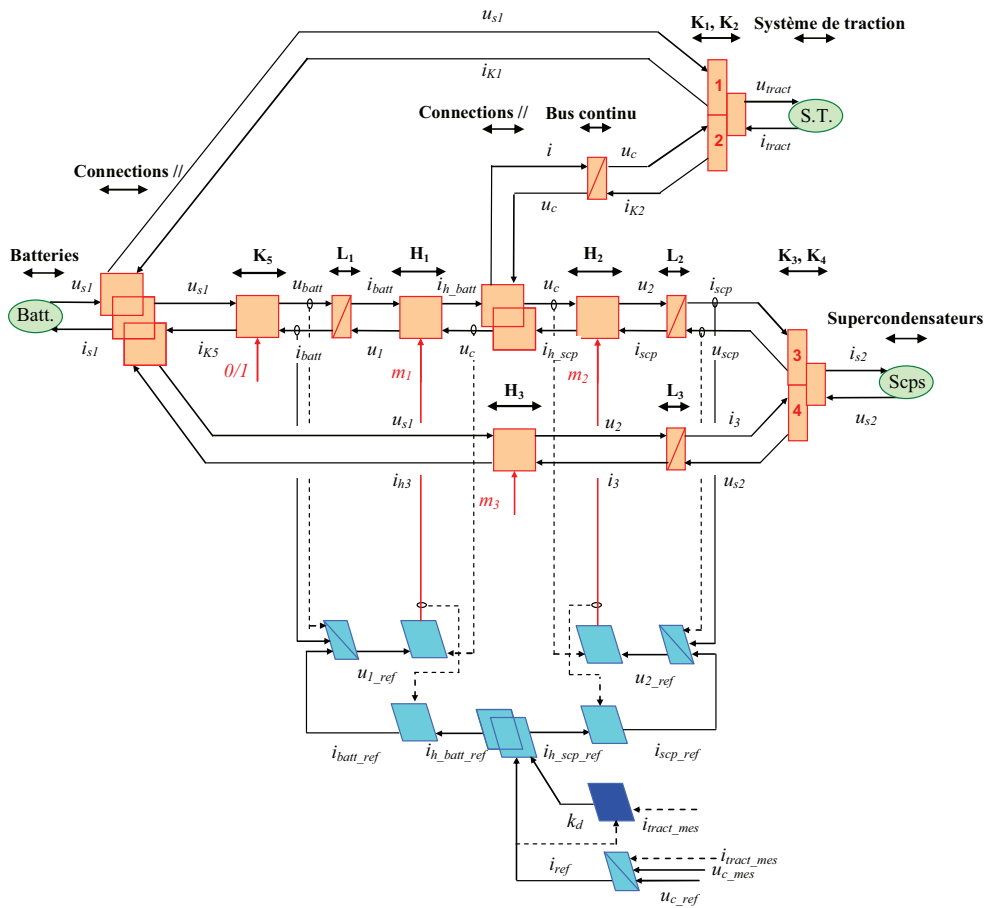


Figure 3-11. Application à la REM de l'architecture générale simplifiée d'un VE mixte

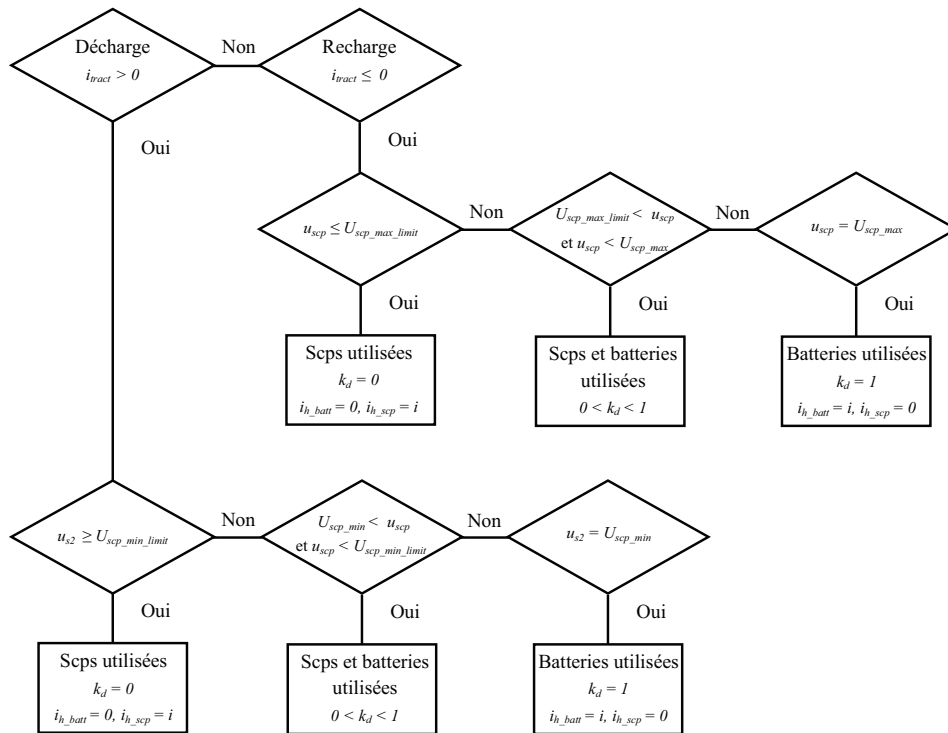


Figure 3-12. Principe de la stratégie avec transition douce

De plus, la structure de commande de notre système fait apparaître des boucles de commande imbriquées : deux boucles internes de courant et une boucle externe de tension. Pour pouvoir découpler

ces boucles de commande, et pouvoir calculer les correcteurs par la méthode de placement de pôle, le temps de réponse de la boucle de tension (0,2 s) est choisi très supérieur à ceux des deux boucles de courants (0,06 s).

La régulation de vitesse du véhicule se fait avec un correcteur PI (modèle du conducteur), et permet de suivre correctement le cycle de vitesse (Figure 3-13.a). La commande permet également de contrôler correctement le bus continu et de le maintenir à 250V quelque soit le cycle de vitesse (Figure 3-13.e). Au départ, les supercondensateurs et les batteries sont complètement rechargés : $u_{scp} = U_{scp_max} = 210V$, $u_{batt} = 193,5V$. Dans un premier temps, les supercondensateurs assurent la traction du véhicule. Durant les phases d'accélération et les phases à vitesse constante, ils fournissent de l'énergie au véhicule, à ce moment là, leur tension u_{scp} (image du SOC) décroît. Pendant les phases de décélération, ils reçoivent une partie de l'énergie cinétique du véhicule et à ce moment là, leur tension u_{scp} (image du SOC) croît (Figure 3-13.c). Ces phases de décélération permettent de recharger partiellement les supercondensateurs mais le trajet ECE ne permet pas de les recharger complètement. Aussi, durant les phases d'accélération et les phases à vitesse constante si les supercondensateurs atteignent la tension $U_{scp_min_limit}$, les batteries prennent progressivement le relais (Figure 3-13.d).

La décroissance progressive du courant dans les supercondensateurs permet d'annuler la chute de tension due à la résistance interne des supercondensateurs (Figure 3-13.c, d) [LHOMME 09]. Pendant ces phases de transition douce, le coefficient de distribution varie de k_d 0 à 1 (Figure 3-13.f). Lorsque $u_{scp} = U_{scp_min}$, les batteries assurent seules la traction du véhicule et le contrôle du bus continu, jusqu'à ce que les supercondensateurs se rechargent à nouveau partiellement au cours de la phase de décélération suivante, et puissent prendre le relais.

Il est important de noter que cette stratégie n'est pas très intéressante pour un véhicule électrique mixte batteries / supercondensateurs. En effet, la stratégie développée ne permet pas d'atteindre un des principaux objectifs d'une telle association, qui consiste à préserver les batteries en utilisant les supercondensateurs pour fournir les pics de puissance. Lorsque les batteries sont utilisées seules, ce sont elles qui fournissent et reçoivent les pics de puissance durant les phases d'accélération et de décélération. D'autres stratégies visant notamment à atteindre cet objectif seront développées au chapitre 4.

❖ Conclusion

Dans cette première partie, la commande d'une voiture électrique mixte a été synthétisée à partir de sa REM. En utilisant une stratégie de gestion simple, la commande a été testée en simulation et donne les résultats attendus : transition douce entre les batteries et les supercondensateurs lorsque les supercondensateurs entrent en limitation de tension basse, contrôle du bus continu et de la vitesse. La structure de commande est donc validée par simulation. Elle va maintenant être testée en temps réel sur un banc expérimental à échelle réduite.

3.1.2.6. Validation expérimentale de la commande

❖ Démarche

La commande présentée précédemment a été validée expérimentalement au moyen d'une simulation **Hardware-in-the-loop (HIL)** à échelle réduite. La simulation HIL consiste à insérer une partie du système réel dans une boucle de simulation.

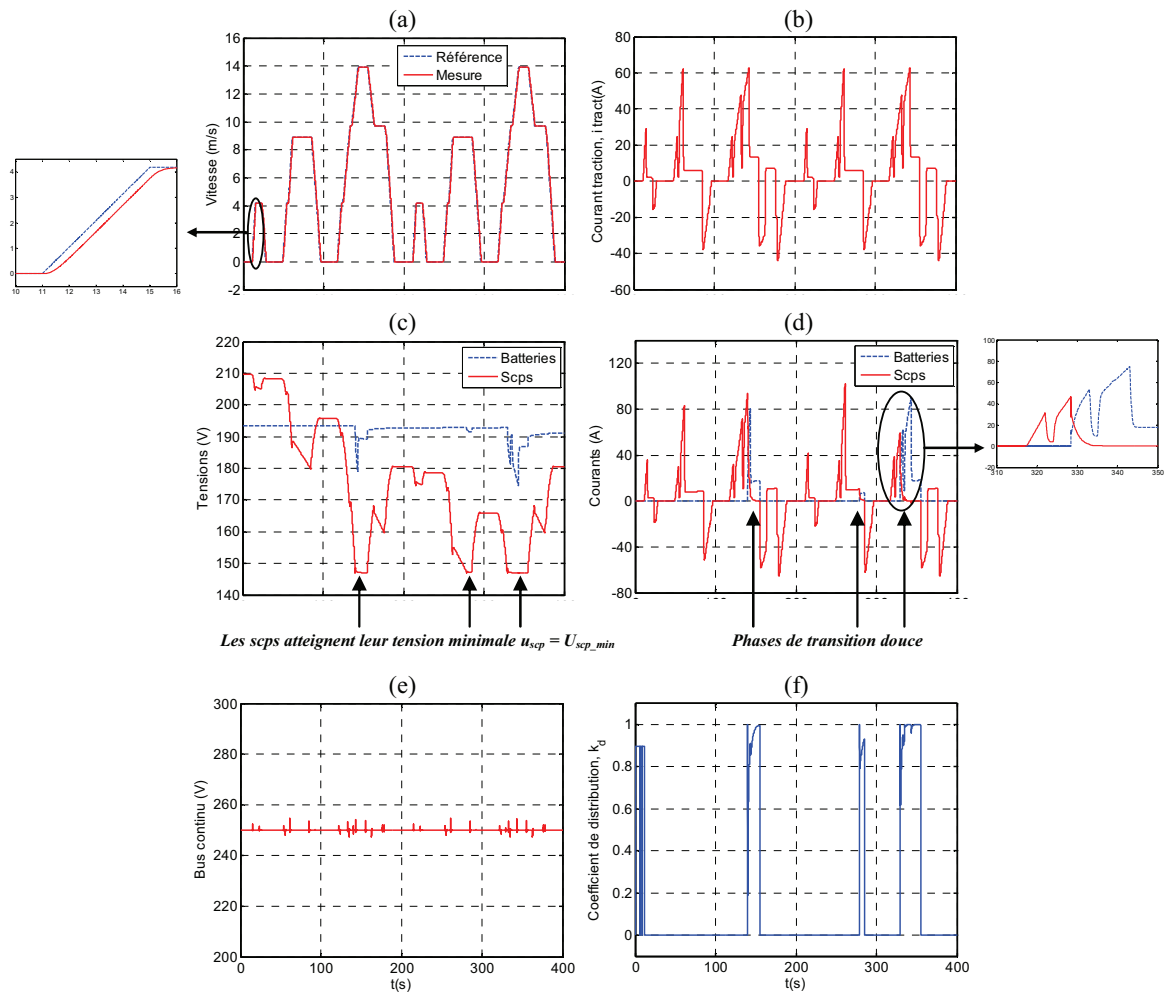


Figure 3-13. Résultats de simulation

Généralement, la simulation HIL est réalisée à pleine échelle, puisque son objectif est d'insérer, par la suite, la partie du système testée dans le système complet [MACLAY 97], [BOUSCAYROL 08], [BOUSCAYROL 10].

Pour le véhicule étudié, le SSE électrique mixte batteries / supercondensateurs est testé à échelle réduite pour une première validation expérimentale et le système de traction est émulé. Une adaptation de puissance est nécessaire pour connecter la partie du système à échelle réduite (SSE électrique mixte, système d'émulation et sa commande) à celle à pleine échelle (système de traction) (Figure 3-14). Plus de détail sur la mise en œuvre de cette simulation HIL à échelle réduite sont donnés en Annexe G.

❖ *Système expérimental*

Le schéma synoptique du système expérimental est donnée Figure 3-15. Le système d'émulation doit reproduire le comportement du système de traction à échelle réduite. Pour notre application, il doit être équivalent à une source de courant puisqu'il reçoit en entrée une tension u_{tract_BP} et doit fournir un courant i_{tract_BP} . Il est constitué d'une inductance L_{emul} , d'un hacheur H_{emul} qui va permettre de contrôler le courant de traction i_{tract_BP} , d'un bus continu de tension u_{c_emul} et d'une résistance (Figure 3-15 et Figure 3-16). Ce système d'émulation est un système à échelle réduite puisqu'il est connecté physiquement au SSE électrique mixte à échelle réduite. Pendant les phases d'accélération et à vitesse constante, le SSE électrique mixte fournit de l'énergie au véhicule, celle-ci est dissipée dans la résistance R_{emul} . Pendant les phases de décélération, le SSE électrique mixte reçoit de l'énergie du véhi-

cule, celle-ci est fournie par le bus continu du système d'émulation. Les caractéristiques du système expérimental et les conditions d'expérimentation sont rassemblées dans le Tableau 3-2.

Concernant le SSE électrique mixte, le banc expérimental ne permet pas pour l'instant l'utilisation des batteries Ni-MH en série, aussi celles-ci ont été remplacées par les batteries Pb (Tableau 3-2).

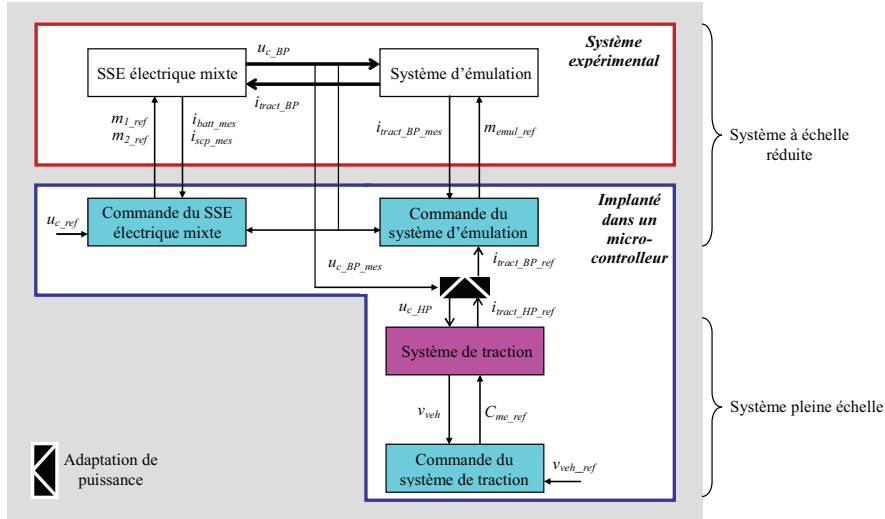


Figure 3-14. Implémentation en temps réel de la simulation HIL à échelle réduite

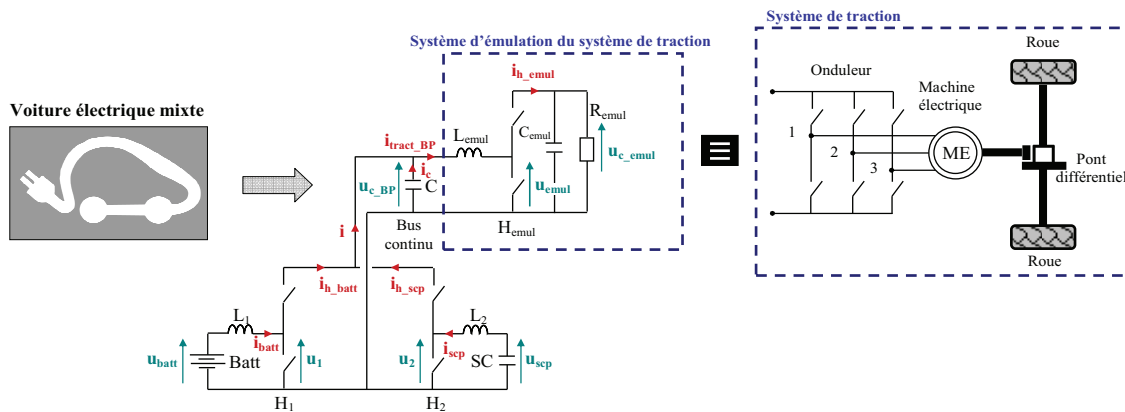


Figure 3-15. Schéma synoptique du système expérimental

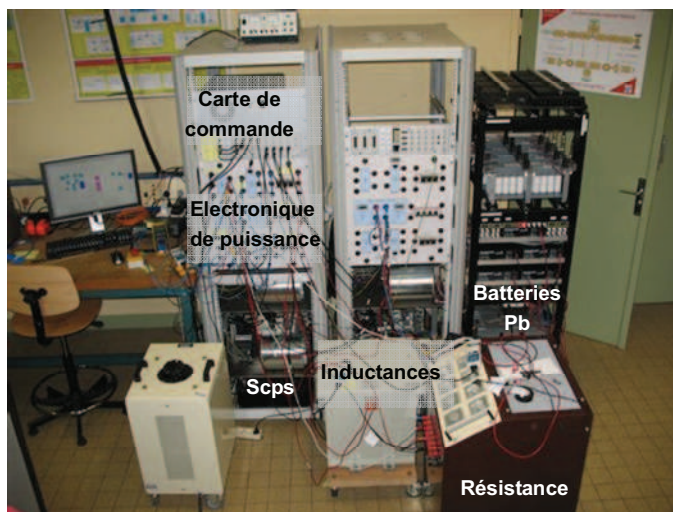


Figure 3-16. Système expérimental

Tableau 3-2. Caractéristiques du système expérimental et conditions d'expérimentation

SSE électrique mixte (échelle réduite)	
Bus continu: $C = 9,9 \text{ mF}$, $u_{c_BP} = 150 \text{ V}$	
Inductances: $L_1 = 213 \text{ mH}$, $r_{L1} = 922 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 70 \text{ mH}$, $r_{L2} = 303 \text{ m}\Omega$	
Batteries : Batteries Pb (15,4 Ah, 12 V) : $N_{p_batt} = 1$, $N_{s_batt} = 4$, $U_{batt_max} = 56,7 \text{ V}$, $U_{batt_min} = 42,4 \text{ V}$	
Supercondensateurs : Scp. Batscap (2600F, 2,5V):	
$N_{p_scp} = 1$, $N_{s_scp} = 20$, $C_{scp} = 130 \text{ F}$, $R_{scp} = 5 \text{ m}\Omega$, $U_{scp_min} = 33 \text{ V}$, $U_{scp_min_limit} = 35,6 \text{ V}$, $U_{scp_max_limit} = 46 \text{ V}$, $U_{scp_max} = 48 \text{ V}$	
Système d'émulation (échelle réduite)	
Bus continu : $v_{dc} = 200 \text{ V}$	Inductance : $L_{emul} = 213 \text{ mH}$, $r_{emul} = 922 \text{ m}\Omega$
Adaptation de puissance	
Coeff. d'adaptation : $k_{\Omega} = 1,3$, $k_i = 23$, $k_p = 39$	Courant traction: $i_{tract_BP_max} = 4,48 \text{ A}$ $i_{tract_HP_max} = 104 \text{ A}$
Tension bus continu : $u_{c_BP} = 150 \text{ V}$, $u_{c_HP} = 250 \text{ V}$	
Système de traction (pleine échelle)	
Moteur : $J_{me} = 0,12 \text{ kg.m}^2$	Chassis: $M_{veh} = 1613 \text{ kg}$, $M_{eq} = 2045 \text{ kg}$
Différentiel : $k_{diff} = 5$, $\eta_{diff} = 0,8$	Environnement : $F_{stat} = 85 \text{ N}$, $c_{aero} = 0.4280$, $c_{visc} = 1,88$
Roue : $R_{roue} = 0,26 \text{ m}$, $J_{roue} = 4,3 \text{ kg.m}^2$, $N_{roue} = 4$	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Temps et Fréquences mis en jeu	
Période de modulation : $T_{mod} = 1 \text{ ms}$	Pas de calcul : $p_{calcul} = 0,1 \text{ ms}$
Fréquence de modulation : $f_{mod} = 1 \text{ kHz}$	

N_{p_batt} : nombre de batteries en parallèle, N_{s_batt} : nombre de batteries en série N_{p_scp} : nombre de supercondensateurs en parallèle, N_{s_scp} : nombre de supercondensateurs en série.

❖ Résultats expérimentaux

Avec les courants mis en jeu et les supercondensateurs mis à disposition, pour que les supercondensateurs atteignent leur tension minimale, il est nécessaire de réaliser l'expérimentation sur 4 cycles normalisés urbains ECE (Figure 3-17), au lieu de 2 cycles comme c'était le cas en simulation pleine échelle (cf. Figure 3-13). Les résultats de la simulation HIL à échelle réduite sont comparés aux résultats expérimentaux (Figure 3-18).

Pour des raisons de limitations de courants, on a du rallonger le temps de réponse en boucle fermée de l'asservissement en vitesse. Ainsi la réponse en vitesse étant relativement lente, l'asservissement ne permet de prendre en compte l'ensemble des fluctuations de la vitesse de référence sur le trajet considéré (Figure 3-17.a). Le courant de traction en sortie du système d'émulation i_{tract_BP} est bien l'image de celui produit par le système de traction $i_{tract_HP_ref}$ (Figure 3-17.b).

La tension de bus continu est correctement contrôlée et maintenue à 150V quelque soit le cycle de vitesse (Figure 3-18.A.c et B.c). Au départ, les supercondensateurs fournissent l'énergie électrique au véhicule, leur tension décroît jusqu'à atteindre la tension limite $U_{scp_min_limit}$ (Figure 3-18.A.b et B.b). A ce moment là, les batteries prennent progressivement le relais (Figure 3-18.A.a et B.a). Les courants fournis par les supercondensateurs et les batteries sont plus importants en expérimentation que ceux fournis en simulation (Figure 3-18.A.a et B.a). Cette différence peut s'expliquer par le fait que les pertes notamment au niveau des hacheurs n'ont pas été considérées dans le modèle de simulation.

❖ Conclusion

La structure de commande de la voiture électrique mixte a été validée en simulation dans le paragraphe précédent. Dans ce paragraphe, elle a été testée expérimentalement en temps réel en utilisant une simulation HIL à échelle réduite.

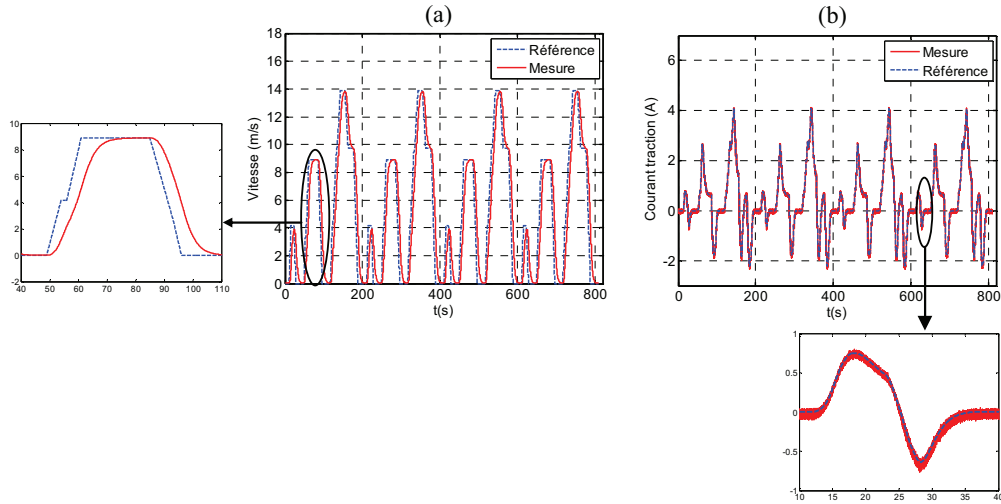
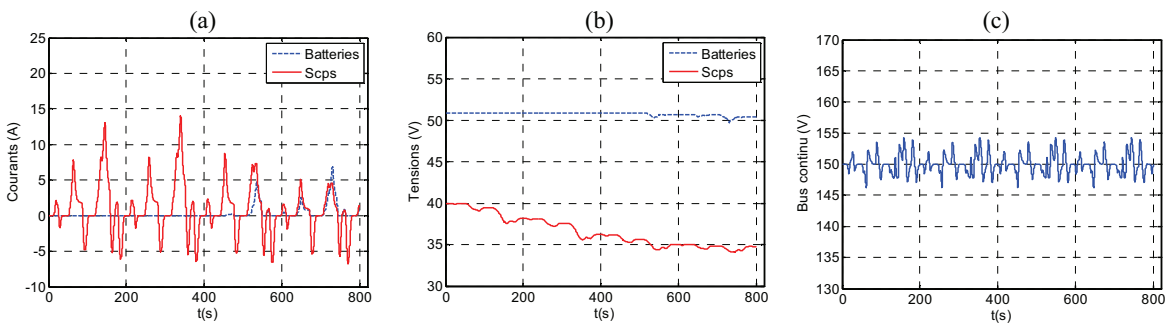
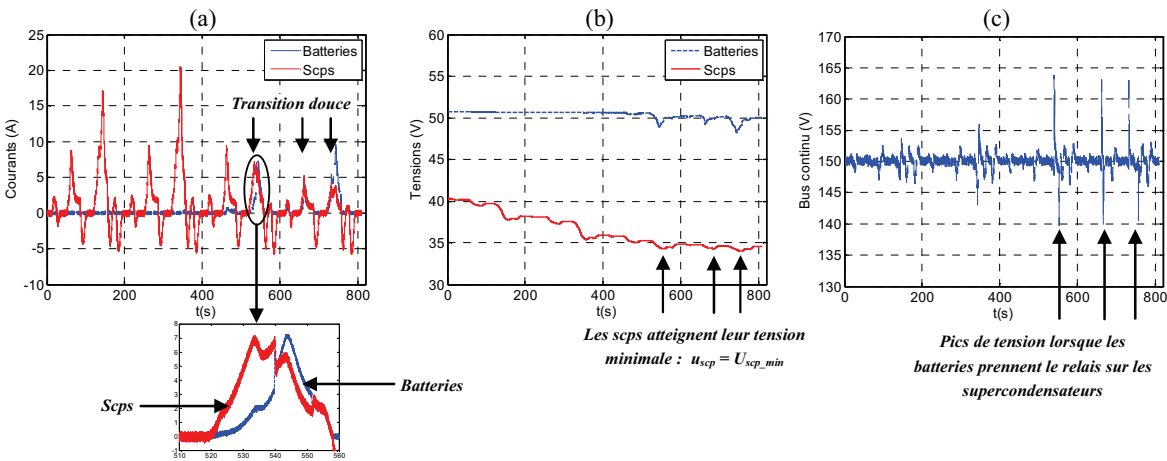


Figure 3-17. Vitesse et courant de traction obtenus par expérimentation



(A) Simulation



(B) Expérimentation

Figure 3-18. Résultats de simulation et expérimentaux pour la stratégie avec transition douce

La commande fonctionne correctement en temps réel et donne les résultats attendus quand aux phases de fonctionnement des stockeurs. On peut cependant noter que l’asservissement en vitesse mis en œuvre ne permet de prendre en compte l’ensemble des fluctuations de la vitesse de référence. Il est important de noter que malgré les nombreux blocs utilisés dans la structure de commande du système, la commande est applicable en temps réel. En effet, la structure de commande ne met en œuvre que

trois correcteurs, mais ces correcteurs étant des correcteurs simples (correcteurs PI pour notre étude), ils nécessitent peu de temps de calcul.

3.1.3. Commande d'un microbus électrique mixte

L'objectif de cette partie vise à élaborer la structure de commande d'un microbus électrique mixte. Cette structure de commande sera validée en simulation puis sur le véhicule réel.

3.1.3.1. Système étudié

Le véhicule étudié est le microbus électrique mixte présenté au chapitre 2 (cf. § 2.1.4.2) (Figure 3-19). L'architecture et la REM du véhicule ont été obtenues à partir de l'architecture et la REM générale simplifiée de VE mixte (Figure 3-19, Figure 3-20).

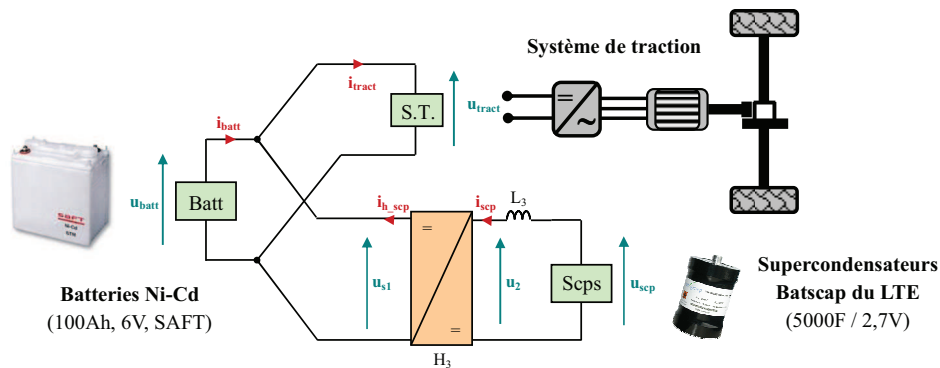


Figure 3-19. Microbus électrique mixte étudié

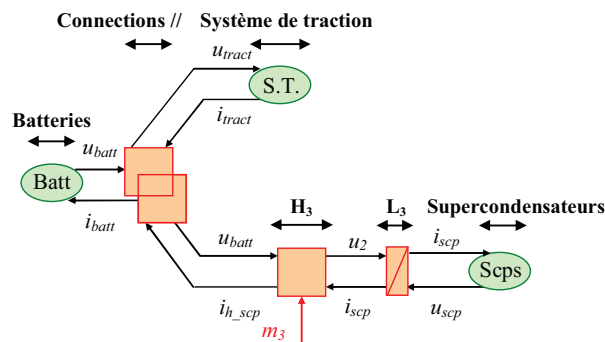


Figure 3-20. Architecture et REM du microbus électrique mixte étudié

3.1.3.2. Commande du SSE électrique mixte

Nous nous intéressons ici à la commande du SSE électrique mixte batteries / supercondensateurs. Après avoir analysé le système et sa REM, son objectif de commande sera défini et sa structure de commande élaborée.

❖ Chaîne de réglage

Ce véhicule dispose de 2 sources électriques pour assurer sa traction, constituées de batteries et de supercondensateurs. Les batteries sont directement connectées au système de traction.

L'objectif de commande du SSE électrique mixte (**objectif 1**) consiste à **gérer la puissance de traction**, c'est-à-dire à fournir la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule pendant les phases d'accélération, à vitesse constante, et absorber la puissance renvoyée par le véhicule pendant les phases de décélération par exemple.

Différentes possibilités sont envisageables pour atteindre cet objectif de commande. La puissance de traction peut être gérée, soit par les batteries, soit par les supercondensateurs, soit par les deux.

Etant donné que le SSE électrique est mixte, nous éliminons les cas où l’objectif de commande est assuré par une seule source électrique. Il ne reste donc que le cas où la puissance de traction est gérée à la fois par les batteries et les supercondensateurs.

Etant donné que la tension u_{tract} est la même que la tension en sortie du hacheur H_3 , pour gérer la puissance de traction du véhicule, il suffit de contrôler, soit le courant i_{h_scp} , soit le courant i_{batt} . Si, par exemple, on choisit de contrôler le courant i_{h_scp} , le courant i_{batt} sera déduit de la loi des nœuds de courants du couplage électrique :

$$i_{batt} = i_{tract} - i_{h_scp} \tag{41}$$

Si maintenant, on choisit de contrôler le courant i_{batt} le courant i_{h_scp} sera également déduit de la loi des nœuds de courants du couplage électrique :

$$i_{h_scp} = i_{tract} - i_{batt} \tag{42}$$

La première chaîne de réglage envisageable relie la fonction de modulation m_3 du hacheur H_3 à la variable i_{h_scp} (Figure 3-21.a). Comme pour la voiture électrique mixte, afin d’éviter tout risque d’instabilité due à la dynamiques de l’inductance L_3 , il est préférable de contrôler également le courant i_{scp} [LHOMME 09] (Figure 3-21.a).

La deuxième chaîne de réglage relie la fonction de modulation m_3 du hacheur H_3 , à la variable i_{batt} .



Figure 3-21. Chaînes de réglage possibles pour le SSE électrique mixte

❖ *Structure de commande du SSE électrique mixte*

La structure de commande du SSE électrique mixte (Figure 3-22), est obtenue en inversant, par exemple, chaque bloc de la deuxième chaîne de réglage (cf. Figure 3-21.b).

L’inversion du hacheur H_3 est semblable à celles des hacheurs H_1 et H_2 et l’inversion de l’inductance L_3 à celles des inductances L_1 et L_2 (cf. § 3.1.2.2.)

Inversion de la connexion parallèle – L’inversion du couplage parallèle nécessite la compensation du courant de traction i_{tract_mes}

$$i_{h_scp_raf} = i_{tract_mes} - i_{batt_ref} \tag{43}$$

Précédemment, pour la commande du SSE électrique mixte de la voiture électrique mixte, le coefficient de distribution k_d permettait de définir les courant de référence i_{hbatt_ref} et $i_{h_batt_ref}$ et ainsi de répartir les flux de puissance entre les batteries et les supercondensateurs. Cette fois-ci, la structure de commande ne fait pas apparaître de coefficient de distribution et le courant de référence i_{hscp_ref} est directement obtenu à partir du courant de référence i_{batt_ref} .

Ainsi si on impose un courant $i_{batt_ref} = 0 A$, la puissance de traction est entièrement fournie par les supercondensateurs. Si on impose $i_{batt_ref} = i_{tract_mes}$, la puissance de traction est entièrement fournie ou reçue par les batteries (Figure 3-21.b). Enfin, si i_{batt_ref} évolue entre $0 A$ et i_{tract_mes} , la puissance de traction fournie ou reçue se partage entre les batteries et les supercondensateurs.

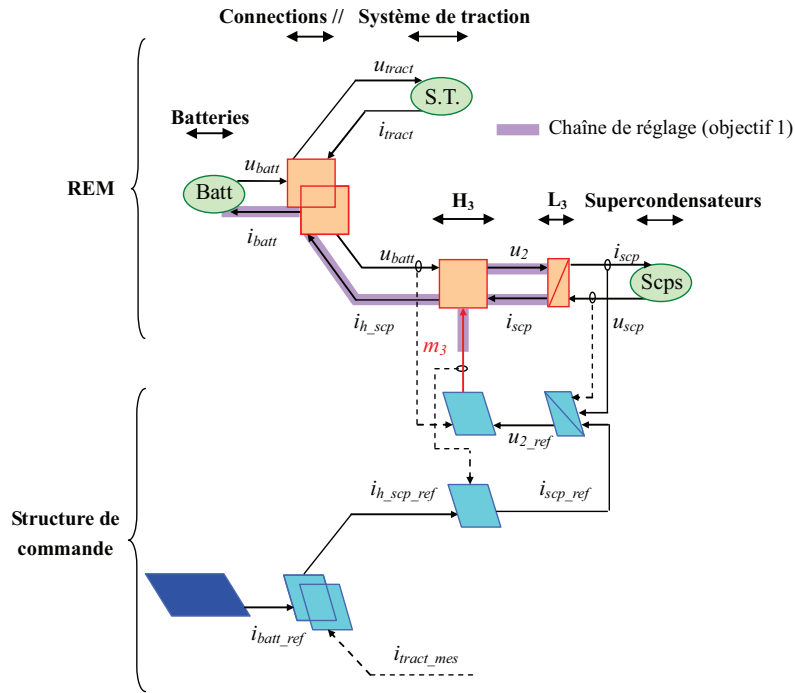


Figure 3-22. REM et structure de commande du microbus électrique mixte étudié

3.1.3.3. Commande du système de traction

Nous nous intéressons ici à la commande du système de traction. Tout comme la voiture électrique mixte, l'objectif de commande du système de traction (**objectif 2**) consiste à **contrôler la vitesse du véhicule**, de façon à ce qu'elle suive le cycle de vitesse de référence.

En simulation, la commande en vitesse du véhicule a été établie par des personnes du LTE [BOUJELBEN 08]. Elle utilise un correcteur de vitesse qui impose en sortie un couple de référence C_{me_ref} . A la différence de la commande en vitesse de la voiture électrique mixte, les limitations en couple en fonction de la vitesse de rotation de la machine électrique sont prises en compte. Ces limitations auraient également pu être introduites dans la commande en vitesse de la voiture électrique mixte [ALLEGRE 08].

3.1.3.4. Application à la REM générale simplifiée d'un VE mixte

La structure de commande développée est appliquée à la REM de l'architecture générale simplifiée d'un VE mixte (Figure 3-23). Afin de retrouver la REM particulière du microbus électrique mixte étudié, il faut que les voies 1 et 4 des aiguilleurs (interrupteurs K_1 et K_4 fermés) soient activées et l'interrupteur K_5 ouvert.

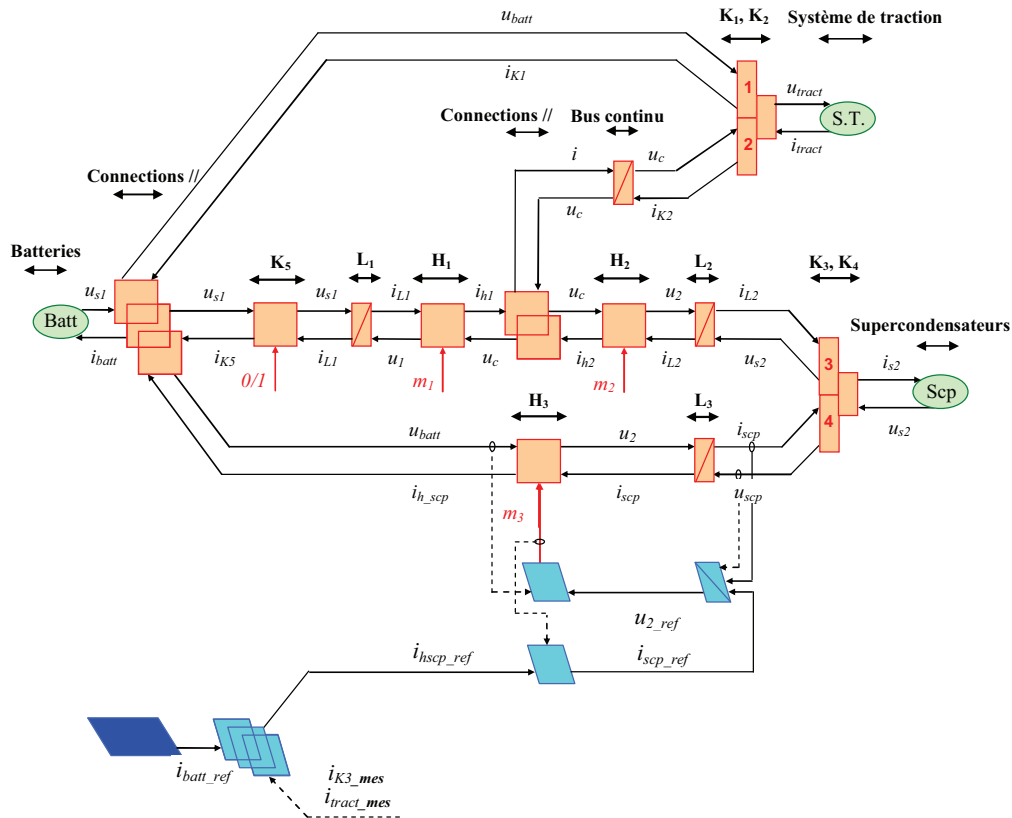


Figure 3-23. Application à la REM de l'architecture générale simplifiée d'un VE mixte

3.1.3.5. Validation de la commande par simulation

❖ Résultats de simulation

Le système étudié est simulé sous Matlab-Simulink et testé sur 2 cycles normalisés urbains ECE (Figure 3-24.a, b). Les caractéristiques du véhicule ont été données chapitre 2, § 2.1.4.2.

La stratégie de gestion de l'énergie est la stratégie « avec transition douce » mise en place au § 3.1.2.5, pour laquelle on a fixé les paramètres suivants : $U_{scp_min} = 71 V$, $U_{scp_min_limit} = 76 V$, $U_{scp_max_limit} = 140 V$, $U_{scp_max} = 142 V$, et un taux de décharge $d_{scp} = 50\%$.

Le correcteur utilisé pour dans le bloc d'inversion de l'inductance L_3 est un correcteur PI. La synthèse de ce correcteur est effectuée par la méthode de placement de pôle en imposant un dépassement nul et en choisissant un temps de réponse en boucle fermée 3 fois plus rapide que celui en boucle ouverte de l'inductance (cf. Annexe F).

La régulation de vitesse du véhicule se fait avec un correcteur PID (modèle du conducteur), et permet de suivre correctement le cycle de vitesse, mais avec un petit dépassement (Figure 3-24.a). Les supercondensateurs fournissent l'énergie électrique au véhicule mais leur tension atteint rapidement la tension limite $U_{s2_min_limit}$ (Figure 3-24.c). A ce moment là, les batteries prennent le relais progressivement (Figure 3-24.d).

❖ Conclusion

Dans cette première partie la commande d'un microbus électrique mixte a été élaborée. En utilisant une stratégie de gestion simple, la commande a été testée en simulation et donne les résultats attendus. La structure de commande est donc validée par simulation. Elle va maintenant être testée en temps réel sur le véhicule réel.

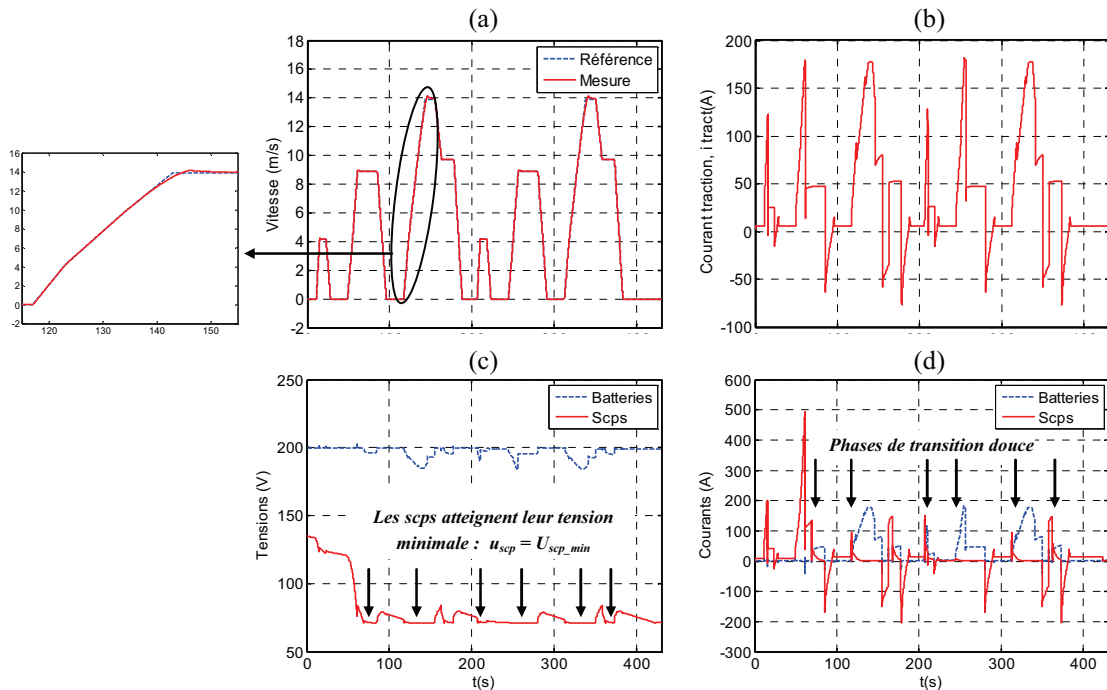


Figure 3-24. Résultats de simulation (Microbus électrique mixte)

3.1.3.6. Validation expérimentale

❖ *Système expérimental*

La structure de commande a été validée sur le microbus électrique mixte réel disponible au LTE (Figure 3-25). Le banc à roulement n'étant pas disponible lors de l'expérimentation, la validation expérimentale a été réalisée sur un trajet défini sur le site du LTE de Bron (Figure 3-26).



Figure 3-25. Microbus électrique mixte réel disponible au LTE

Un cahier des charges de conduite est établi de manière à ce que ce trajet soit le plus reproductible possible : arrêt de 5 s, accélération maximale jusqu'à avoir une vitesse de 30 km/h (cf. Figure 3-26), (Figure 3-27.a).

❖ *Résultats expérimentaux*

La stratégie de gestion de l'énergie est la stratégie « tout ou rien » avec transition douce lorsque les batteries prennent le relais sur les supercondensateurs (Figure 3-28.b). La stratégie mise en œuvre présente une variante : lorsque le véhicule s'arrête, les batteries rechargent les supercondensateurs à courant constant ($i_{batt_max} = 100A$) (Figure 3-28.b). Cette variante permet de retarder le moment où les supercondensateurs atteignent leur limitation de tension basse. En fin de trajet, les supercondensateurs sont rechargés jusqu'à leur tension maximale ($SOC_{scp} = 100\%$) (Figure 3-28.d, e).

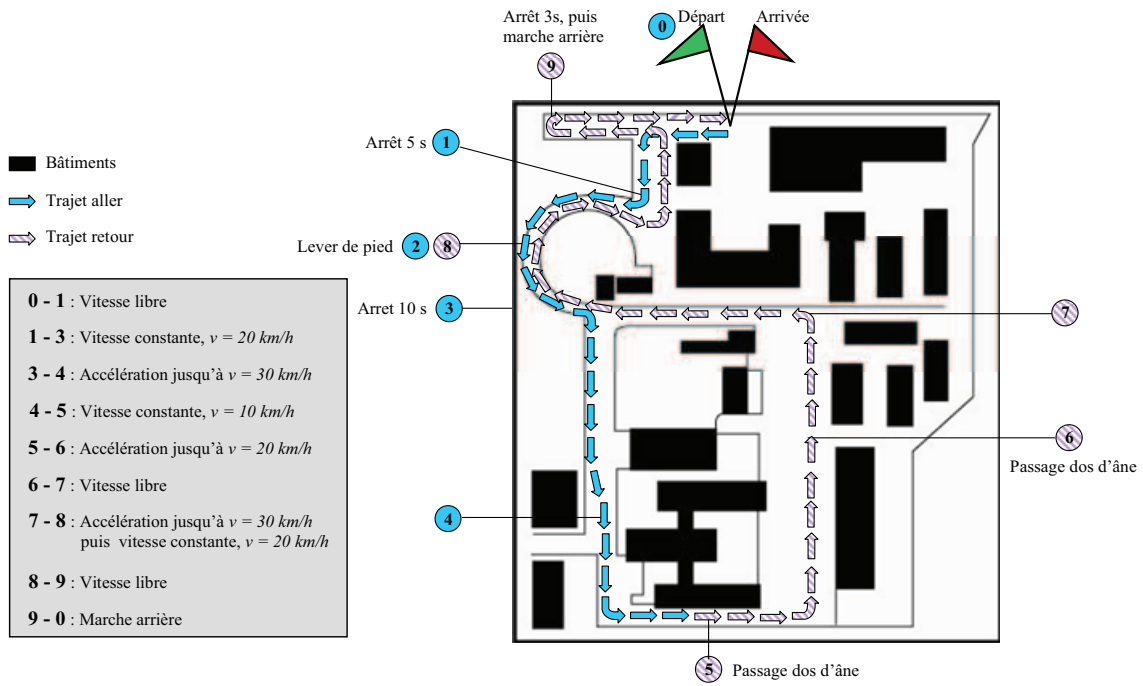


Figure 3-26. Trajet de test sur le site du LTE

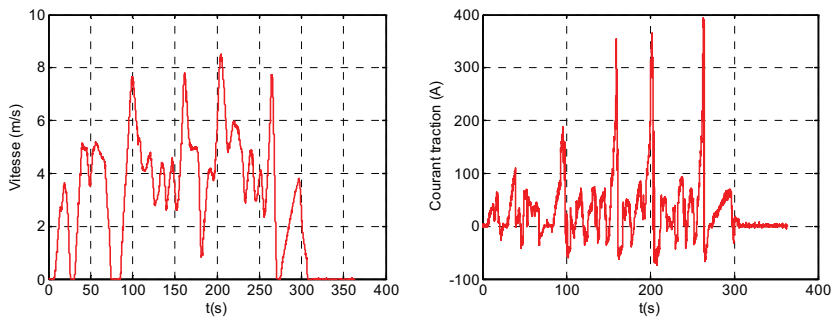


Figure 3-27. Vitesse et courant de traction

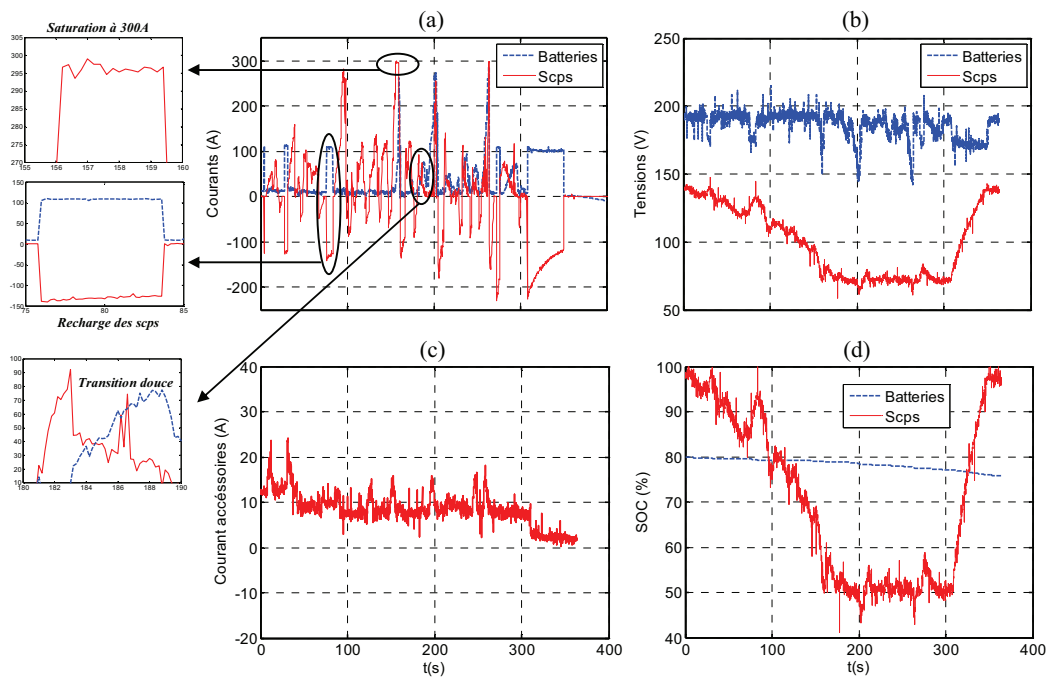


Figure 3-28. Résultats expérimentaux

Il faut également noter que les IGBT du hacheur H_3 sont protégés en courant : $-300 \text{ A} < i_{scp} < 300 \text{ A}$. Ainsi en phase d'accélération lorsque le courant i_{scp} atteint 300 A, les batteries prennent à ce moment là le relais (Figure 3-28.c).

❖ *Conclusion*

Dans cette partie, la structure de commande du microbus électrique mixte a également été validée en simulation puis a été testée sur le véhicule réel. La commande fonctionne correctement en temps réel et donne les résultats attendus : recharge des supercondensateurs par les batteries à l'arrêt, transition douce entre les deux stockeurs... Par conséquent, la structure de commande développée est bien validée expérimentalement, en temps réel, sur le véhicule réel.

3.2. Commande de véhicules mixtes à 4 sources électriques

L'objectif de cette partie est d'établir la commande de deux véhicules mixtes à 4 sources électriques : voiture électrique hybride mixte et métro électrique mixte à 4 sources électriques.

3.2.1. Approche

Une architecture générale de véhicules mixtes à 4 sources électriques et sa REM, ont été mises en œuvre au chapitre 2. A partir de cette REM générale, les REMs particulières de deux véhicules mixtes, une voiture électrique hybride mixte et un métro électrique mixte, ont été obtenues. L'analyse de ces deux REMs particulières va nous permettre de construire la structure de commande de chacun de ces deux véhicules (Figure 3-29).

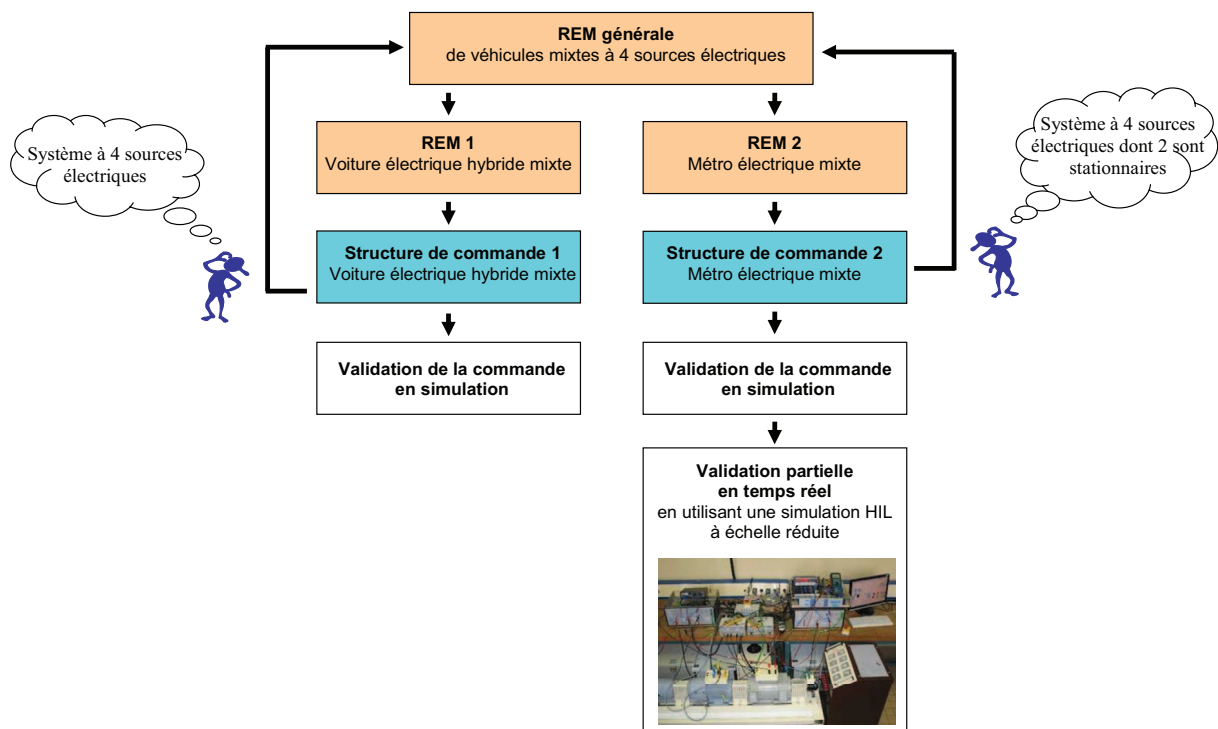


Figure 3-29. Approche

Ces commandes seront appliquées à la REM générale de véhicules mixtes à 4 sources électriques. La première partie du chapitre 3 a traité de la commande de VEs mixte à 3 sources électriques. Dans cette partie, pour la voiture électrique hybride mixte, la commande va être étendue à 4 sources électriques et validée par simulation. La particularité du métro électrique mixte est que 2 de ces sources

électriques sont embarquées et les 2 autres sont stationnaires. La commande sera étendue à ce type de véhicule, validée par simulation et partiellement en temps réel.

3.2.2. Commande d'une voiture électrique hybride mixte

L'objectif de cette partie vise à étendre la commande à un véhicule mixte à 4 sources, et en particulier à une voiture électrique hybride mixte. Cette commande sera validée en simulation.

3.2.2.1. Système étudié

Le véhicule étudié est la voiture électrique hybride mixte de type série qui a été présentée au chapitre 2 (cf. § 2.2.4.1). L'architecture et la REM du véhicule ont été obtenues à partir de l'architecture et la REM générales simplifiées d'un véhicule mixte à 4 sources électriques (Figure 3-30, Figure 3-31).

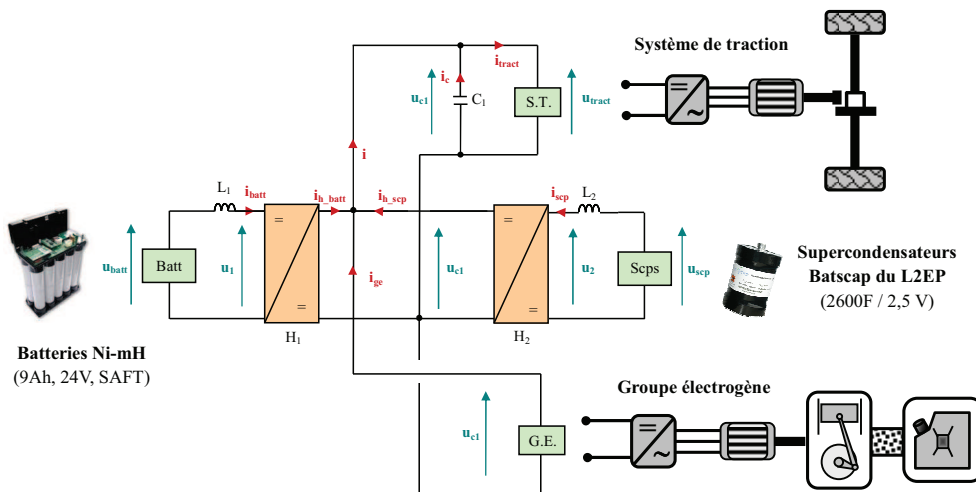


Figure 3-30. Architecture de la voiture électrique hybride mixte étudiée

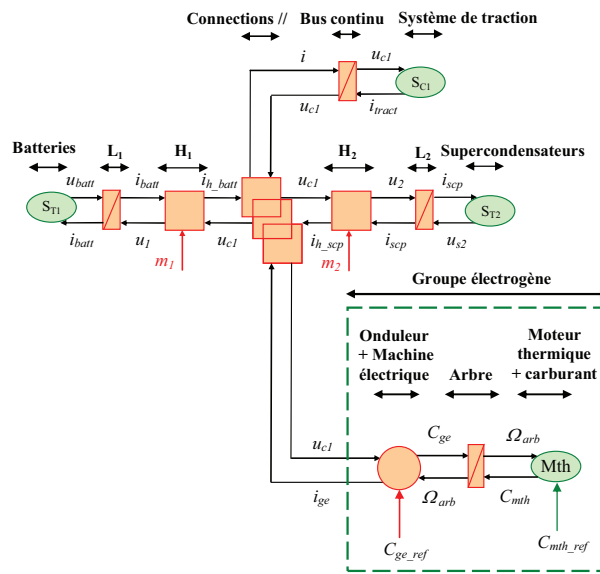


Figure 3-31. REM de la voiture électrique hybride mixte étudiée

3.2.2.2. Commande du véhicule

L'analyse du véhicule et de sa REM va nous permettre de définir ses objectifs de commande et d'élaborer sa structure de commande.

Les objectifs de commande du véhicule sont les suivants :

- **objectif 1 : contrôler la tension du bus continu u_c** , afin de la maintenir constante quelques soient les flux d'énergie échangés entre les sources électriques.
- **objectif 2 : gérer la puissance de traction**, c'est-à-dire fournir la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule pendant les phases d'accélération et à vitesse constante et absorber la puissance renvoyée par le véhicule pendant les phases de décélération.
- **objectif 3 : contrôler la vitesse du véhicule**, de façon à ce qu'elle suive le cycle de vitesse de référence.

Pour notre étude, nous ne considérerons le véhicule qu'en zone urbaine, ainsi nous nous fixerons comme contrainte (**contrainte 1**) de **n'utiliser le moteur thermique qu'à son point de fonctionnement optimal**.

Différentes possibilités sont envisageables pour atteindre les deux premiers objectifs de commande. Le bus continu peut être contrôlé soit par les batteries, soit par les supercondensateurs, soit par le groupe électrogène, soit par deux de ces sources électriques, soit par les trois sources électriques ensemble. Il en est de même pour la gestion de la puissance de traction.

Etant donné le nombre de possibilités de commande envisageables pour atteindre ces deux objectifs, nous avons choisi de ne traiter qu'un cas. Étant donné que l'on veut utiliser le moins possible le moteur thermique, nous avons décidé que le contrôle du bus continu serait assuré par les batteries et les supercondensateurs. La gestion de la puissance de traction sera effectuée par les batteries, les supercondensateurs et le groupe électrogène.

Le moteur thermique étant toujours utilisé à son point de fonctionnement optimal, le groupe électrogène fournit une puissance P_{ge} constante. Etant donné que la tension de bus continu u_{c1} est constante, le courant en sortie du groupe électrogène i_{ge} sera toujours constant :

$$P_{ge} = u_{c1} i_{ge} = cte \quad \text{et} \quad u_{c1} = cte \quad \Rightarrow \quad i_{ge} = cte \quad (44)$$

Pour gérer la puissance de traction, étant donné que la tension u_c est maintenue constante, il suffit de contrôler le courant i . Lorsque le groupe électrogène participe à la puissance de traction, le contrôle du courant i se fait par les courants i_{h_batt} et i_{h_scp} , le courant i_{ge} agit comme une perturbation car il est imposé par le fonctionnement optimal du moteur thermique (cf. Figure 3-31).

Ainsi la chaîne de réglage permettant de contrôler le bus continu et de gérer la puissance de traction peut se ramener à celle établie pour la voiture électrique mixte pour le cas 1 au § 3.2.2.2 (Figure 3-32). La chaîne de réglage permettant de contrôler la vitesse du véhicule est identique à celle établie pour la voiture électrique mixte (cf. § 3.1.2.3). Afin d'utiliser le moteur thermique à son point de fonctionnement optimal, nous avons choisi d'asservir le moteur thermique en couple et la génératrice électrique en vitesse. La première chaîne de réglage relie le couple de référence C_{mth_ref} à la variable C_{mth} tandis que la deuxième chaîne de réglage relie le couple de référence C_{ge_ref} à la variable Ω_{arb} (Figure 3-33).

❖ *Structure de commande*

Le couplage électrique de la REM de la voiture (cf. Figure 3-31) est décomposé en deux couplages électriques de manière à en déduire plus facilement la structure de commande du système (Figure 3-34).

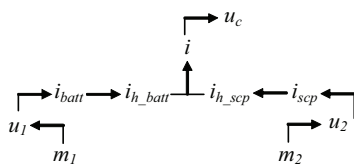


Figure 3-32. Chaîne de réglage du SSE électrique

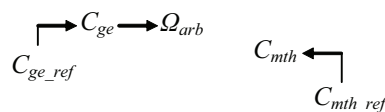


Figure 3-33. Chaîne de réglage du groupe électrogène

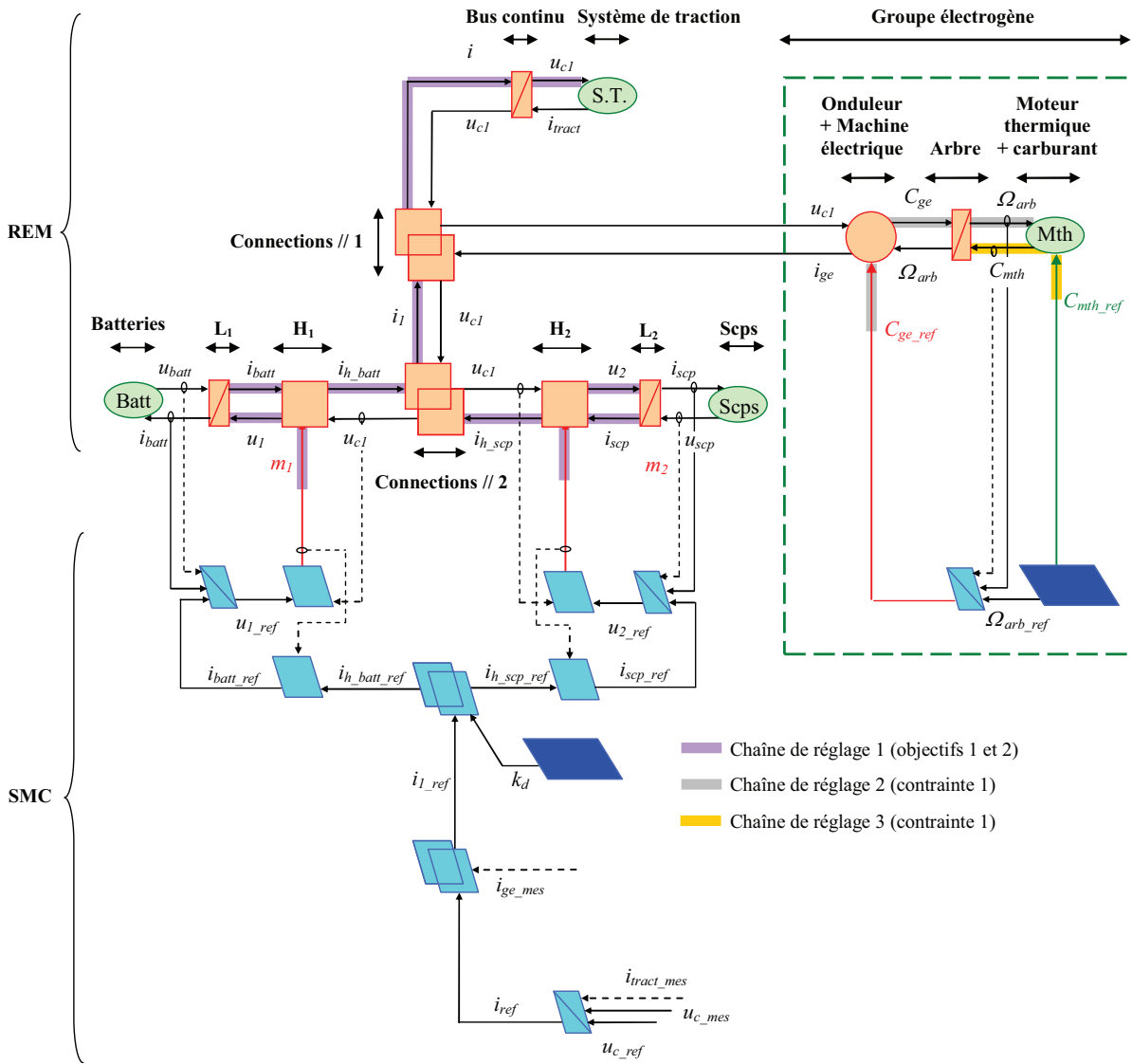


Figure 3-34. Chaîne de réglage pour le contrôle du bus continu

Les inversions du bus continu, des hacheurs H_1 et H_2 , et des inductances L_1 et L_2 ont été détaillées au § 3.1.2.2.

Inversion des connexions parallèles – Le contrôle du courant i se fait à l’aide du seul courant i_1 . Ainsi, dans l’inversion de la connexion parallèle 1, il est nécessaire de compenser le courant i_{ge} en le mesurant, car celui-ci agit comme une entrée de perturbation :

$$i_{1_ref} = i_{ref} - i_{ge_mes} \text{ avec } i_{1_ref} = i_{h_batt_ref} + i_{h_scp_ref} \quad (45)$$

L’inversion de la connexion parallèle 2 permet de définir les deux courants de référence $i_{h_batt_ref}$ et $i_{h_scp_ref}$ à partir du courant i_{1_ref} , en introduisant un coefficient de distribution k_d (cf. § 3.1.2.2.) (Figure 3-34):

$$\begin{cases} i_{h_batt_ref} = k_d i_{1_ref} \\ i_{h_scp_ref} = (1 - k_d) i_{1_ref} \end{cases} \text{ avec } 0 < k_d < 1 \quad (46)$$

Inversion de l’arbre – En REM, l’arbre est représenté par un élément d’accumulation. Son inversion nécessite un correcteur C_{arb} et la compensation du couple mesuré C_{mth} :

$$C_{ge_ref} = C_{arb}(\Omega_{arb_ref} - \Omega_{arb_mes}) + C_{mth_mes} \quad (47)$$

3.2.2.3. Application à la REM générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 sources électriques

La structure de commande développée est appliquée à la REM générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 sources électriques (Figure 3-35).

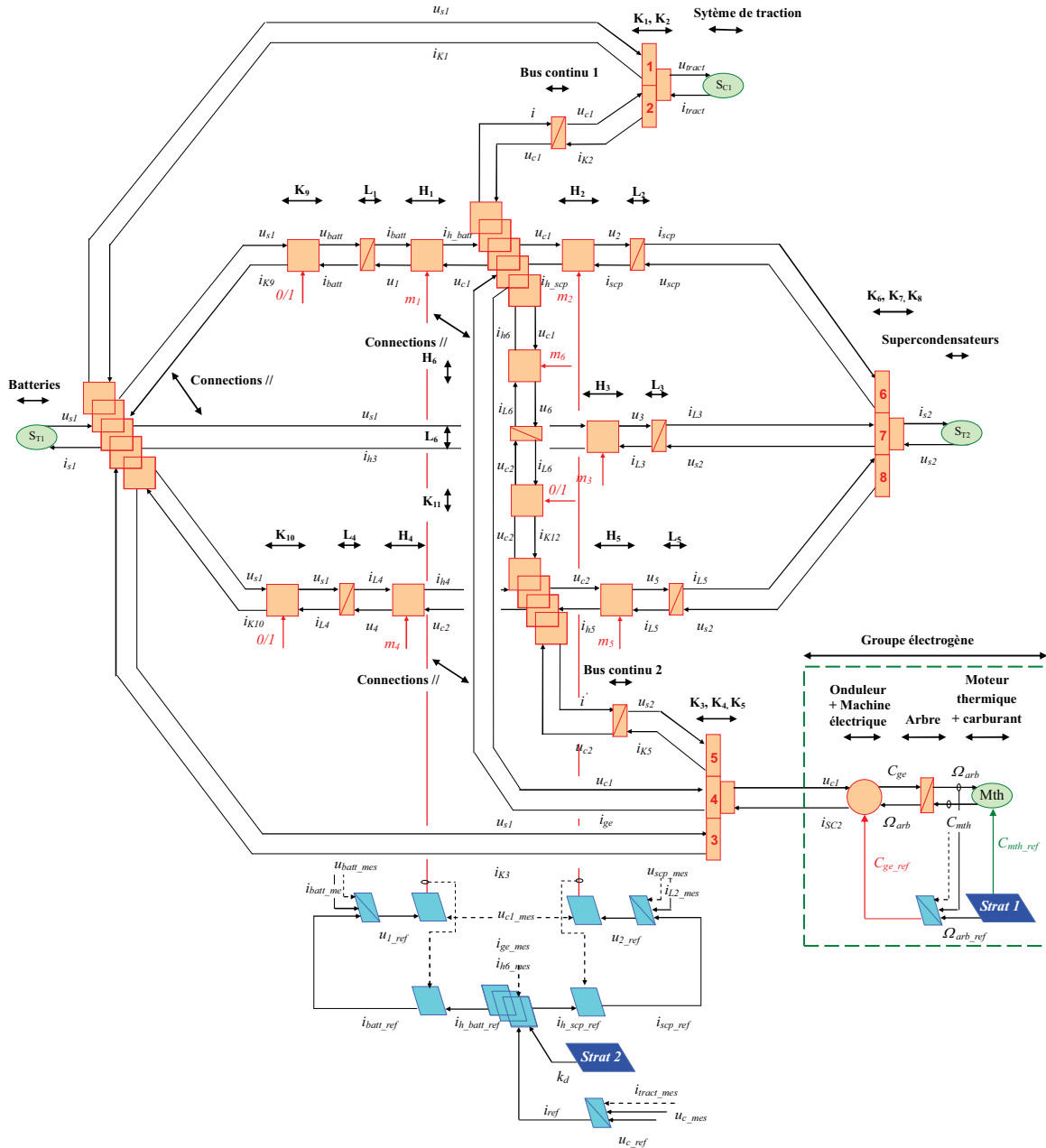


Figure 3-35. Application à la REM générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 SEs

Pour retrouver la REM particulière de la voiture électrique hybride étudiée, il faut que les voies 2 et 6 des aiguilleurs soient activées, l'interrupteur K_9 fermé (commande à 1) et les interrupteurs K_{10} et K_{11} ouverts (commande à 0).

3.2.2.4. Validation de la commande par simulation

La stratégie de gestion de l'énergie mise en place va permettre de valider la structure de commande développée. Des résultats de simulation seront présentés.

❖ *Stratégie de gestion de l'énergie*

La stratégie de gestion de l'énergie est basée sur la stratégie « avec transition douce » utilisée pour la voiture électrique mixte au § 3.1.2.5 (Figure 3-36). Les supercondensateurs sont utilisés tant que la tension à leurs bornes, u_{scp} , n'a pas atteint la tension limite $U_{scp_min_limit}$. A ce moment là, les batteries prennent progressivement le relais et le moteur thermique est mis en route.

Lorsque les supercondensateurs sont entièrement rechargés, à la fois par le moteur thermique et par la puissance renvoyée par le véhicule pendant les phases de décélération, ils assurent à nouveau la traction du véhicule.

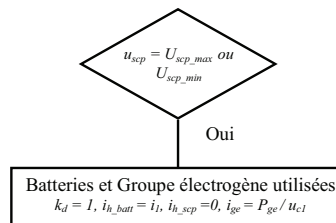


Figure 3-36. Actions en mode de limitation

❖ *Résultats de simulation*

Le véhicule étudié est simulé en transposant sa REM sous Matlab-Simulink. La simulation est réalisée sur 2 cycles normalisés urbains ECE (Figure 3-37). Les caractéristiques du véhicule ont été données au chapitre 2 (cf. § 2.1.4.1 et 2.2.4.1). Pour mettre en œuvre la stratégie de gestion de l'énergie, on a fixé les paramètres suivants : $U_{scp_min} = 147 V$, $U_{scp_min_limit} = 149 V$, $U_{scp_max_limit} = 208 V$, $U_{scp_max} = 210 V$, un taux de décharge $d_{scp} = 70\%$, $P_{ge_opt} = 10kW$.

La régulation de vitesse du véhicule est effective, et la vitesse suit correctement le cycle de vitesse (Figure 3-37.a). La commande permet également de contrôler correctement le bus continu et de le maintenir à 250V quelque soit le cycle de vitesse (Figure 3-37.b). Au départ, les supercondensateurs sont entièrement rechargés : $u_{scp} = U_{scp_max}$. Dans un premier temps, les supercondensateurs assurent la traction du véhicule et le contrôle du bus continu. Lorsqu'ils atteignent la tension limite $U_{scp_min_limit}$, les batteries prennent progressivement le relais. Lorsque $u_{scp} = U_{scp_min}$, le moteur thermique est mis en route et assure, avec les batteries, la traction du véhicule jusqu'à la phase de décélération suivante. Le moteur thermique permet également de recharger les supercondensateurs. Lorsque $u_{scp} = U_{scp_max_limit}$, le moteur thermique est arrêté, les batteries absorbent, si nécessaire, le surplus d'énergie renvoyé vers les supercondensateurs jusqu'à ce que les supercondensateurs soient complètement rechargés ($u_{scp} = U_{scp_max}$).

❖ *Conclusion*

Dans la première partie de ce chapitre, les structures de commande de deux VEs mixtes à trois sources électriques ont été établies et validées en simulation et en expérimentation. Dans cette partie, la commande a été étendue à une voiture hybride électrique mixte, véhicule mixte à 4 sources électriques. En utilisant une stratégie de gestion simple, la commande a été testée en simulation. Les résultats de simulation sont conformes aux attentes : utilisation du groupe électrogène dès que les supercondensateurs entrent en limitation de tension basse, transition douce entre les batteries et les supercondensateurs, fonctionnement optimal du moteur thermique.... La structure de commande est donc validée par simulation.

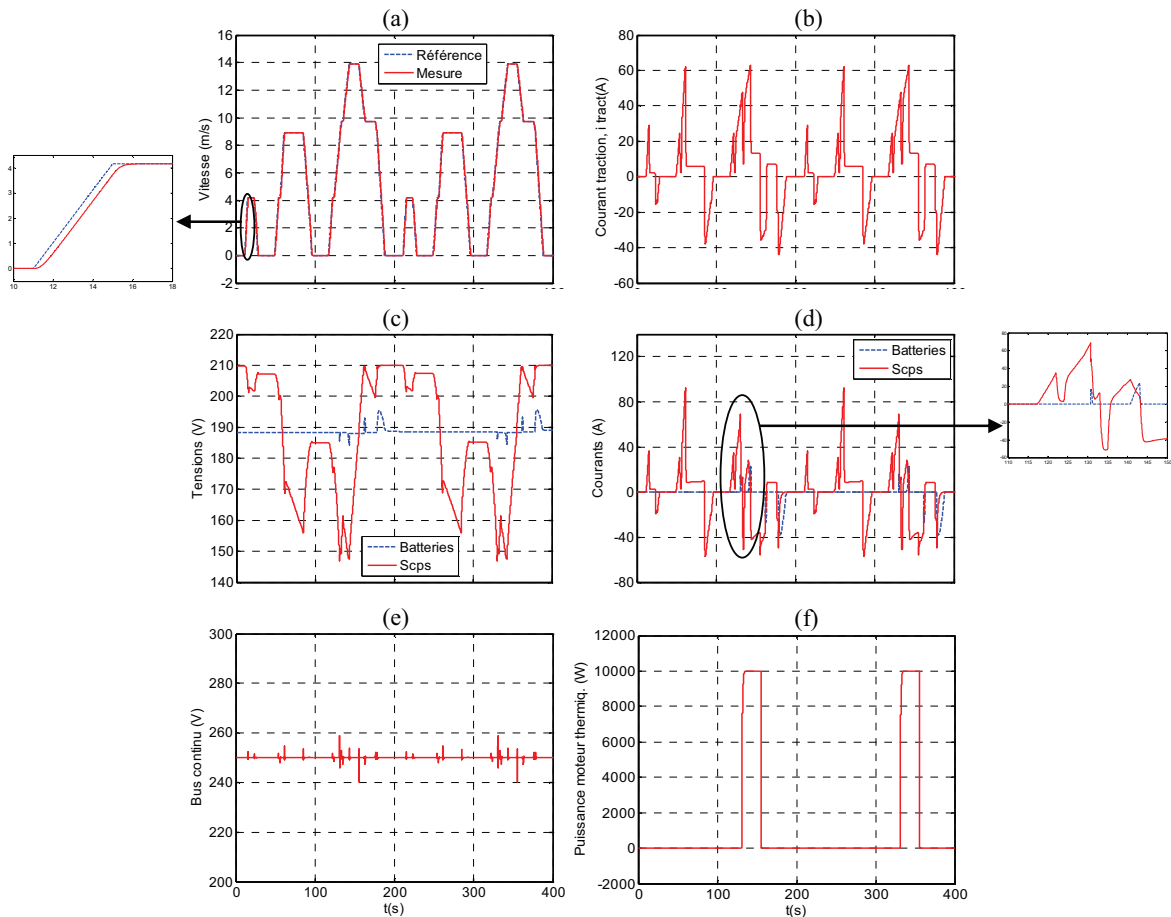


Figure 3-37. Résultats de simulation

3.2.3. Commande d'un métro électrique mixte

L'objectif de cette partie vise à étendre la commande aux véhicules mixtes à 4 sources ayant à la fois des sources électriques embarquées et stationnaires. Le véhicule étudié est un métro électrique mixte dont la particularité est que 2 de ses sources sont embarquées (des supercondensateurs et le système de traction) et les 2 autres sont stationnaires (des supercondensateurs et un système connecté au réseau). Ce véhicule s'inspire du métro « Néoval », étudié dans le cadre d'une collaboration entre le L2EP et Siemens Transportation System (STS) [ALLEGRE 07]. A la différence du système initial, un hacheur est introduit entre le système réseau et le bus continu, ce qui change considérablement les données en termes de commande. La commande du véhicule sera validée en simulation et partiellement en expérimentation.

3.2.3.1. Système étudié

Le véhicule étudié est le métro électrique mixte qui a été présenté au chapitre 2 (cf. § 2.2.4.2). L'architecture et la REM du véhicule ont été obtenues respectivement, à partir de l'architecture et de la REM générale simplifiée d'un véhicule mixte à 4 sources électriques (Figure 3-38 et Figure 3-39).

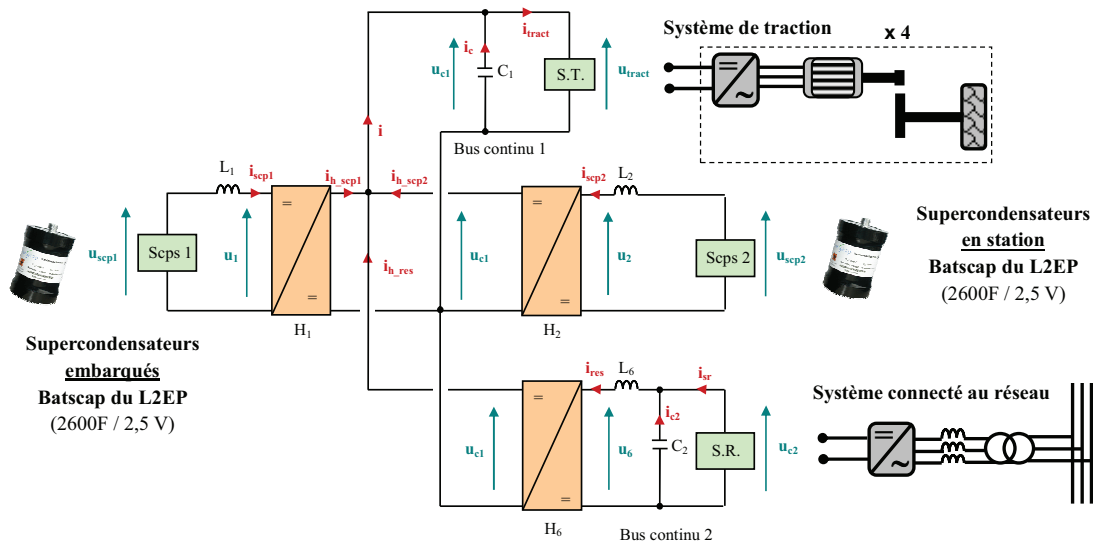


Figure 3-38. Architecture du métro électrique mixte étudié

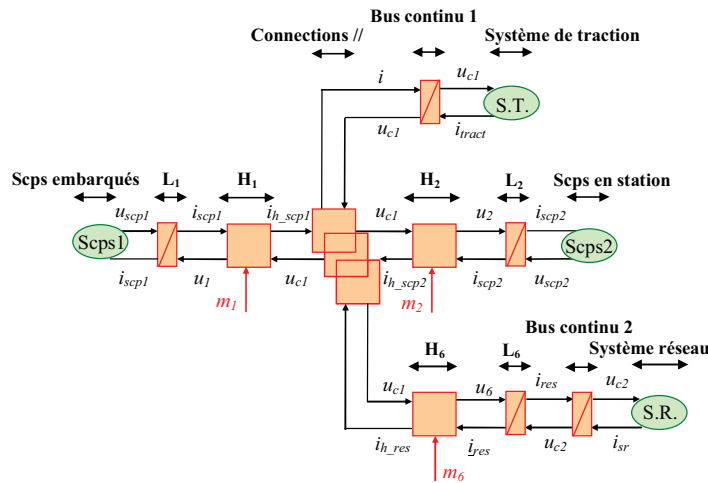


Figure 3-39. REM du métro mixte étudié

Le système étudié dispose d'un bus continu. En réalité, le système est composé de deux bus continus : un bus continu en station et un bus continu embarqué. Afin de simplifier l'étude, nous ne considérerons ici qu'un unique bus continu (cf. § 2.1.4.2.).

Deux phases sont à distinguer dans le fonctionnement du véhicule : la phase où le métro est en station, et la phase où il est entre deux stations. En effet, au cours de ces deux phases, les objectifs de commande sont différents.

3.2.3.2. Commande du métro en station

On s'intéresse dans cette partie à la commande du métro, à l'arrêt, en station. L'analyse du système et de sa REM va nous permettre de définir ses objectifs de commande et d'élaborer sa structure de commande.

❖ Chaînes de réglage

Pendant le temps que le métro reste à l'arrêt en station, les supercondensateurs embarqués sont entièrement rechargés.

Les objectifs de commande métro en station sont les suivants :

- **objectif 1 : contrôler la tension du bus continu u_c** , afin de la maintenir constante quelques soient les flux d'énergie échangés entre les sources électriques.

- **objectif 2 : recharger les supercondensateurs embarqués** pendant le laps de temps où le métro est en station.

Différentes possibilités sont envisageables pour atteindre ces deux premiers objectifs. Le bus continu peut donc être contrôlé, soit par les supercondensateurs embarqués, soit par les supercondensateurs en station, soit par le système réseau, soit par deux de ces sources électriques, soit par les trois sources électriques ensemble. La puissance nécessaire à la recharge des supercondensateurs embarqués peut être fournie soit par les supercondensateurs en station, soit par le système réseau, soit par les deux.

Etant donné le nombre de possibilités de commande envisageables pour atteindre ces deux objectifs, nous avons choisi de ne traiter qu'un cas. Les supercondensateurs embarqués sont entièrement rechargés pendant le temps où le métro reste à l'arrêt en station. Ce laps de temps étant de l'ordre de quelques dizaines de secondes, les puissances mises en jeu sont très élevées. Si le système réseau assure à lui seul cette recharge, les contraintes en courant seront par conséquent très importantes. C'est la raison pour laquelle, pour notre application, nous avons décidé que la recharge des supercondensateurs embarqués serait uniquement effectuée par le banc de supercondensateurs en station. Pour réaliser cet objectif il est nécessaire de contrôler la puissance absorbée par les supercondensateurs embarqués de façon à ce que la puissance fournie par les supercondensateurs en station soit entièrement absorbée par les supercondensateurs embarqués (**contrainte 1**). De plus, afin de ne pas solliciter d'avantage les supercondensateurs en station et de ne pas décharger les supercondensateurs embarqués, nous avons décidé que le contrôle du bus continu serait assuré par le système réseau.

La première chaîne de réglage, dont l'objectif est d'assurer le contrôle du bus continu, relie la fonction de modulation m_6 du hacheur H_6 , à la variable u_c , tout en contrôlant le courant i_{res} , qui traversent l'inductance L_6 (Figure 3-40.a).

La deuxième chaîne de réglage a pour objectif de recharger les supercondensateurs embarqués. Elle relie la fonction de modulation m_2 du hacheur H_2 , à la variable i_{scp2} . En effet, par le contrôle du courant i_{scp2} , les supercondensateurs en station sont en mesure de fournir la puissance de recharge (Figure 3-40.b).

La troisième chaîne de réglage vise à contrôler la puissance absorbée par les supercondensateurs embarqués. Elle relie la fonction de modulation m_1 du hacheur H_1 , à la variable i_{scp1} . Ainsi, par le contrôle du courant i_{scp1} , les supercondensateurs embarqués pourront contrôler la puissance absorbée (Figure 3-40.c).

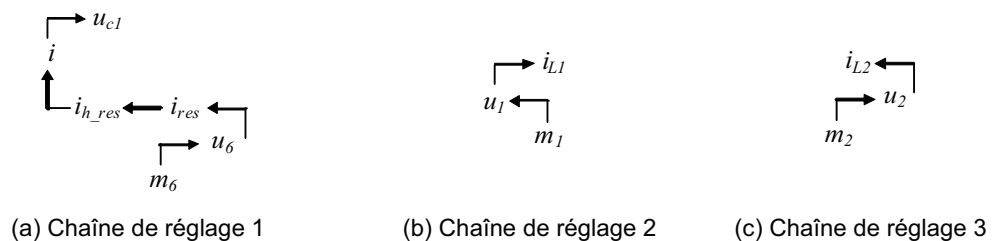


Figure 3-40. Chaînes de réglage du métro, à l'arrêt, en station

❖ *Structure de commande*

La connexion parallèle de la REM du métro (cf. Figure 3-39), est décomposée en deux connexions parallèles de manière à en déduire plus facilement la structure de commande du métro en station (Figure 3-41). Celle-ci est obtenue en inversant chaque bloc des chaînes de réglage du véhicule (Figure 3-41).

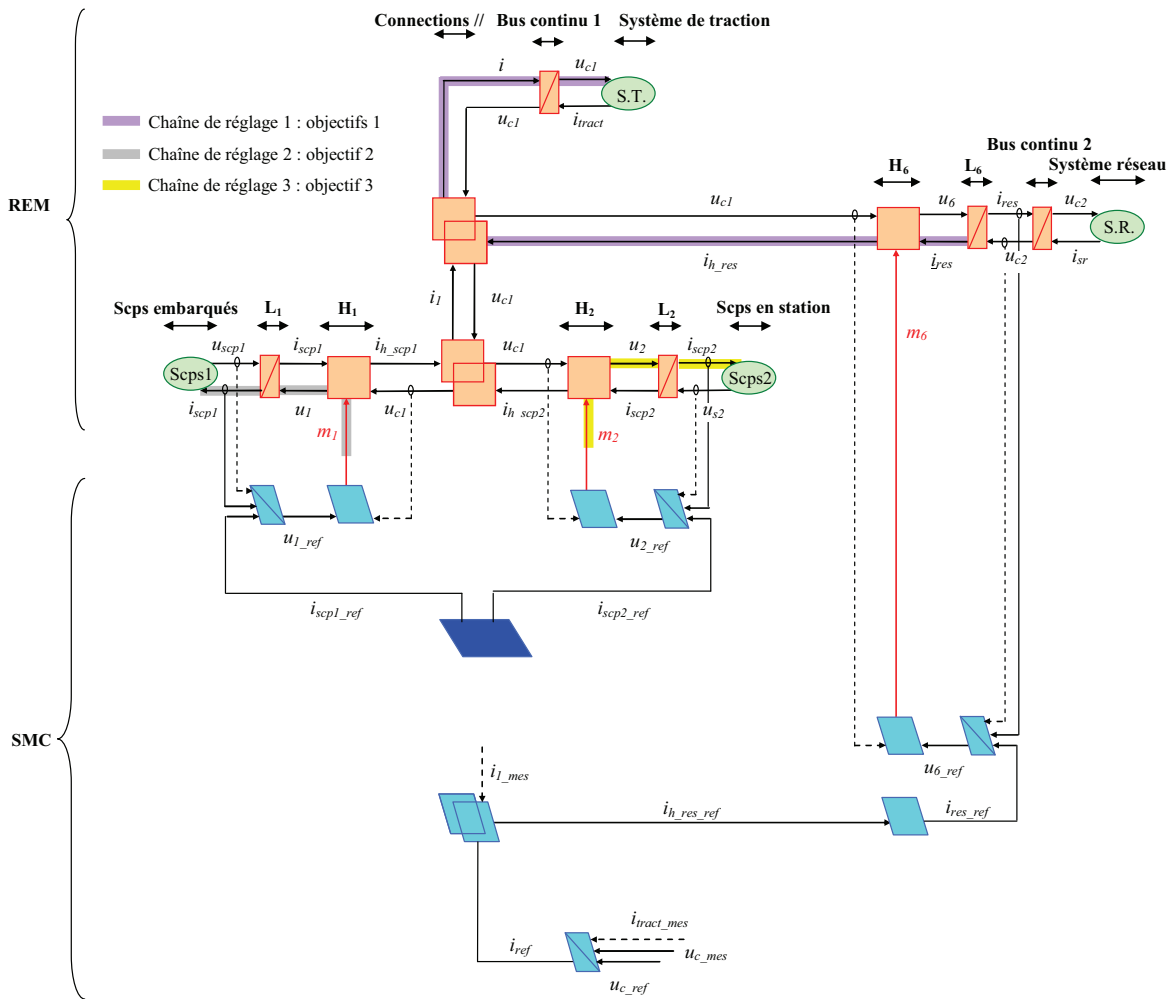


Figure 3-41. REM et structure de commande du métro à l'arrêt, en station

Les inversions du bus continu, des hacheurs H_1 et H_2 , et des inductances L_1 et L_2 ont été détaillées § 3.1.2.2. L'inversion du hacheur H_6 est semblable à celles des hacheurs H_1 et H_2 et l'inversion de l'inductance L_6 à celles des inductances L_1 et L_2 .

Inversion de la connexion parallèle 1 – Le contrôle du courant i se fait à l'aide du seul courant i_{h_res} . Ainsi, dans l'inversion de la connexion électrique 1, il est nécessaire de compenser le courant i_1 en le mesurant, car celui-ci agit comme une entrée de perturbation (Figure 3-41) :

$$i_{h_res_ref} = i_{ref} - i_{1_mes} \quad \text{avec} \quad i_{1_mes} = i_{h_sc1_mes} + i_{h_sc2_mes} \quad (48)$$

3.2.3.3. Commande du métro entre deux stations

On s'intéresse dans cette partie à la commande du métro entre deux stations. L'analyse du système et de sa REM va permettre de définir ses objectifs de commande et d'élaborer sa structure de commande.

❖ Chaînes de réglage

Un rail d'alimentation est installé sur la longueur de station ainsi que sur une portion de l'interstation (Figure 3-42). Ce rail d'alimentation permet au système d'alimentation en station d'assurer la traction du métro pendant une partie de la phase d'accélération où la puissance demandée est importante. Ainsi, l'énergie à embarquer est réduite ainsi que volume et le poids du banc de supercondensateurs embarqué. Une étude a été menée sur l'influence de la longueur du rail d'alimentation et l'influence du relief du trajet sur l'énergie à embarquer [ALLEGRE 10a].

Lorsque le métro quitte le rail d'alimentation, à ce moment là ce sont les supercondensateurs embarqués qui assurent la traction du véhicule jusqu'à la station suivante.

Les objectifs de commande du métro entre deux stations sont les suivants :

- **objectif 1 : contrôler la tension du bus continu 1 u_{c1}** , afin de la maintenir constante quelques soient les flux d'énergie échangés entre les SEs.
- **objectif 2 : gérer la puissance de traction**, c'est-à-dire fournir la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule pendant les phases d'accélération et à vitesse constante, et absorber la puissance renvoyée par le véhicule pendant les phases de décélération par exemple.
- **objectif 3 : contrôler la vitesse du véhicule**, de façon à ce qu'elle suive le cycle de vitesse de référence.

La commande du métro entre deux stations s'effectue en deux phases : la phase 1 où le métro accélère sur le rail d'alimentation et la phase 2 où le métro quitte le rail d'alimentation.

Au cours de la phase 1, comme précédemment pour le métro en station, différentes possibilités sont envisageables pour atteindre les deux premiers objectifs (cf. § précédent).

Au cours de la phase 2, le bus continu 1 est nécessairement contrôlé par les supercondensateurs en station. En effet, lorsque le métro quitte le rail, il n'y a plus de connexion entre le métro et le système en station (supercondensateur en station et système réseau). De même, la puissance de traction est nécessairement fournie par les supercondensateurs embarqués.

Etant donné le nombre de possibilités de commande envisageables pour atteindre les deux premiers objectifs lorsque le métro accélère sur le rail d'alimentation, nous avons choisi de ne traiter qu'un cas. Lorsque le métro accélère sur le rail d'alimentation en début d'interstation, afin de ne pas décharger le banc de supercondensateurs embarqués, c'est le banc de supercondensateurs en station ainsi que le système réseau qui fournissent l'énergie nécessaire à la traction du véhicule. Lorsque le métro quitte le rail d'alimentation, à ce moment là ce sont les supercondensateurs embarqués qui prennent le relais jusqu'à la station suivante. Lorsque le métro quitte le rail d'alimentation, le bus continu 1 est nécessairement contrôlé par le banc de supercondensateurs embarqué. Aussi, nous avons décidé que ce serait également le cas lorsque le métro accélère sur le rail d'alimentation.

La première chaîne de réglage relie la fonction de modulation m_1 du hacheur H_1 à la variable u_{c1} , tout en contrôlant le courant i_{scp1} qui traverse l'inductance L_1 (Figure 3-43).

Cette chaîne de réglage va permettre aux supercondensateurs embarqués de contrôler la tension du bus continu 1 pendant que le métro accélère sur le rail d'alimentation. Lorsque le métro quitte le rail d'alimentation, elle va permettre aux supercondensateurs embarqués de contrôler le bus continu 1, et de gérer la puissance de traction en fournissant le courant i .

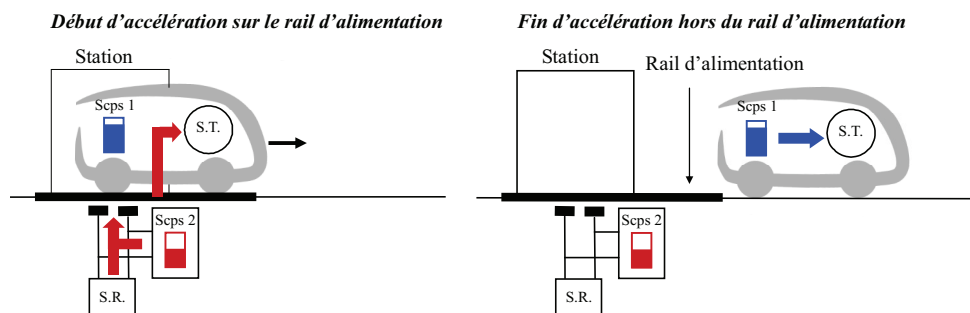


Figure 3-42. Principe de fonctionnement du métro entre deux stations

La deuxième chaîne de réglage relie les fonctions de modulation m_2 et m_6 des hacheurs H_2 et H_6 , à la variable i_2 , somme des courants i_{h_scp2} et i_{h_res} . Cette chaîne de réglage va permettre aux supercondensateurs en station et au système réseau de gérer la puissance de traction pendant que le métro accélère sur le rail d'alimentation. Il est important de noter, qu'étant donné que l'on utilise 2 entrées

de réglage pour remplir 1 objectif, il sera nécessaire d'introduire, dans la commande, un critère de répartition pour définir les courants de référence $i_{h_scp2_ref}$ et $i_{h_res_ref}$.

La troisième chaîne de réglage a pour objectif de contrôler la vitesse du véhicule et est identique à celle établie pour la voiture électrique mixte (cf. § 3.1.2.3).

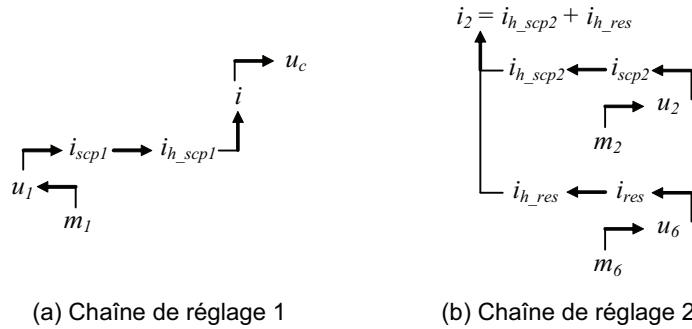


Figure 3-43. Chaîne de réglage du métro entre deux stations

❖ *Structure de commande*

La connexion parallèle de la REM du métro est à nouveau décomposée de manière à faire apparaître le courant i_2 et en déduire plus facilement la structure de commande entre deux stations (Figure 3-44). Celle-ci est obtenue en inversant chaque bloc des chaînes de réglage.

Inversion de la connexion parallèle 1 – Le contrôle du courant i se fait à l'aide du seul courant i_{h_scp1} . Ainsi, dans l'inversion de la connexion parallèle 1, il est nécessaire de compenser le courant i_2 en le mesurant, car celui-ci agit comme une entrée de perturbation :

$$i_{h_scp1_ref} = i_{ref} - i_{2_mes} \quad \text{avec} \quad i_{2_mes} = i_{h_scp2_mes} + i_{h_res_mes} \tag{49}$$

Il est également possible de définir les courants de référence i_{hsc1_ref} et i_{2_ref} en introduisant un coefficient de distribution k_{d1} (cf. § 4.1.2.2.) (**Figure 3-7.b**) :

$$\begin{cases} i_{2_ref} = k_{d1} i_{ref} \\ i_{h_scp1_ref} = (1 - k_{d1}) i_{ref} \end{cases} \quad \text{avec} \quad 0 < k_{d1} < 1 \tag{50}$$

En fonctionnement normal, pour que les supercondensateurs en station et le système réseau puissent gérer la puissance de traction, le courant de référence i_{2_ref} est fixé, égal au courant de traction mesuré i_{tract_mes} :

$$\text{En fonctionnement normal, on veut : } i_{2_ref} = i_{tract_mes} \Rightarrow k_{d1} = \frac{i_{tract_mes}}{i_{ref}} \tag{51}$$

Inversion de la connexion parallèle 2 – Les deux courants de référence $i_{h_scp2_ref}$ et $i_{h_res_ref}$ sont définis à partir du courant i_{2ref} . L'inversion du second couplage électrique nécessite donc l'introduction d'un coefficient de distribution k_{d2} qui va permettre de contrôler la distribution des flux de puissance entre les supercondensateurs en station et le système réseau (52).

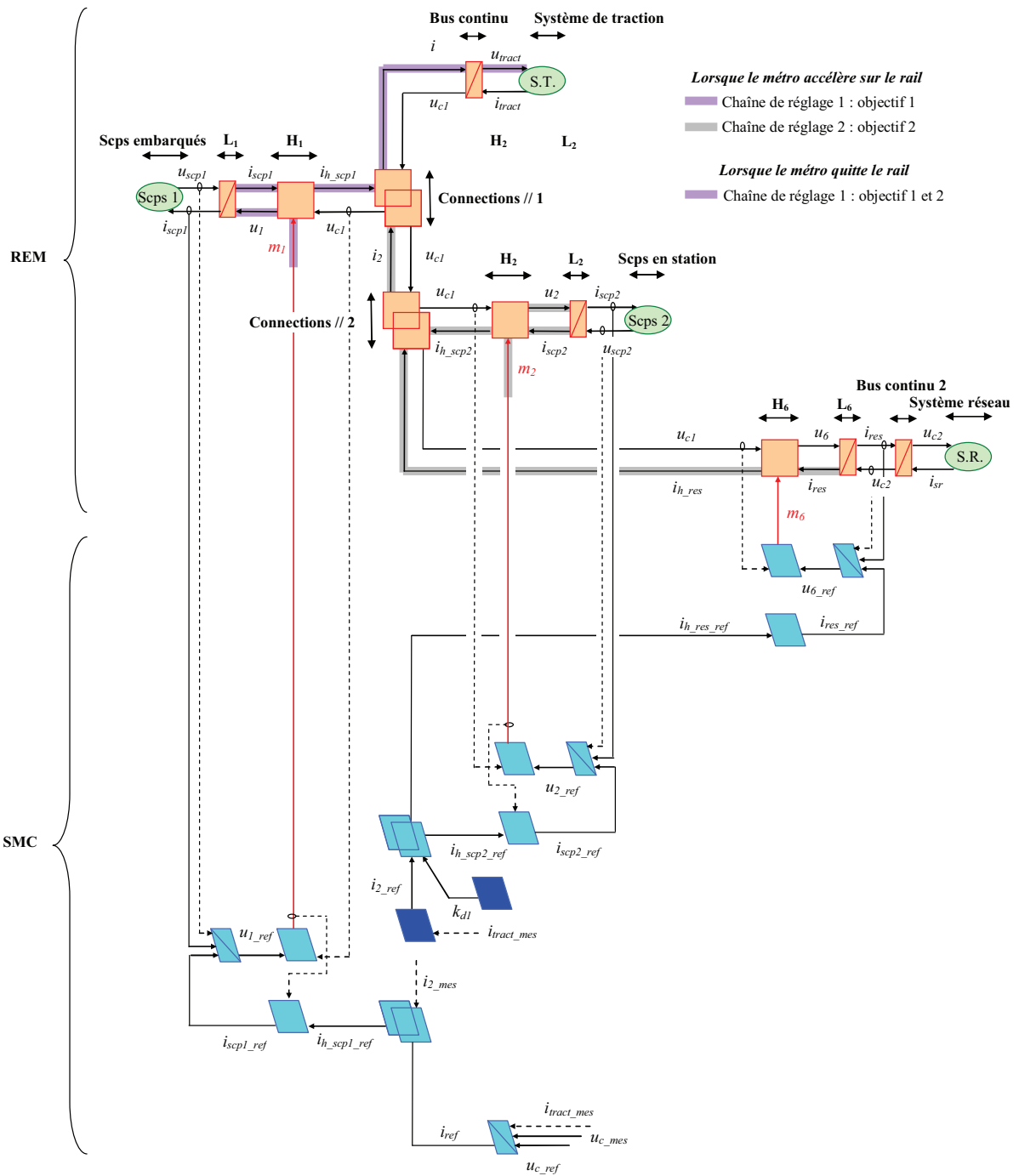


Figure 3-44. REM et structure de commande du métro entre deux stations

On introduit également un coefficient k_{rail} pour prendre en compte ou non le rail d'alimentation.

$$\begin{cases} i_{h_scp2_ref} = k_{rail} k_{d2} i_{2_ref} \\ i_{h_res_ref} = k_{rail} (1 - k_{d2}) i_{2_ref} \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} k_{rail} = 1 & \text{si le métro est sur le rail d'alimentation} \\ k_{rail} = 0 & \text{si le métro n'est pas sur le rail d'alimentation} \end{cases} \quad (52)$$

Les inversions des deux connexions parallèles peuvent être rassemblées en un seul élément d'inversion qui définit les courants de référence $i_{h_scp1_ref}$, $i_{h_scp2_ref}$ et $i_{h_res_ref}$ en utilisant les coefficients de distribution k_{d1} et k_{d2} (cf. Figure 3-45.c).

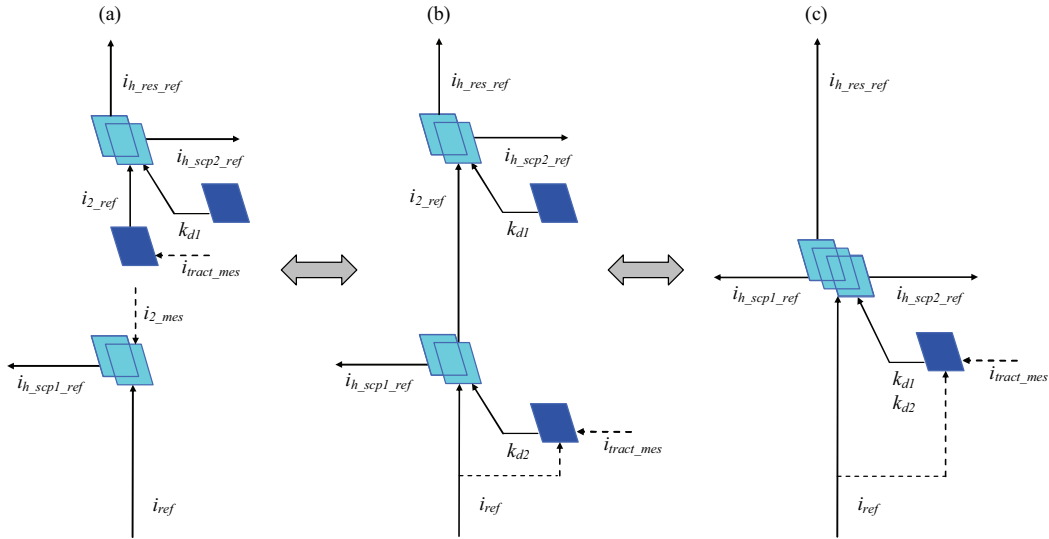


Figure 3-45. REM et structure de commande du métro entre deux stations

3.2.3.4. Commande du métro (en station et entre deux stations)

La commande du métro est obtenue par superposition de la commande du métro en station et du métro entre deux stations (Figure 3-46). Deux aiguilleurs de commande sont introduits, de manière à passer d’une commande à l’autre suivant si le métro est en station (voies A des aiguilleurs activées) ou entre deux stations station (voies B des aiguilleurs activées).

L’inversion du couplage électrique met en jeu des relations différentes pour les deux phases de fonctionnement du métro, obtenues à partir de (48), (35) et (52) :

- Lorsque le métro est en station :

$$\begin{cases} i_{scp1_refA} \\ i_{scp2_refA} \\ i_{h_res_ref} = i_{ref} - (i_{h_scp1_mes} + i_{h_scp2_mes}) \end{cases} \quad (53)$$

- Lorsque le métro est entre deux stations :

$$\begin{cases} i_{h_scp1_refB} = (1 - k_{d1})i_{ref} \\ i_{h_scp2_refB} = k_{rail}k_{d2}k_{d1}i_{ref} \\ i_{h_res_refB} = k_{rail}(1 - k_{d2})k_{d1}i_{ref} \end{cases} \quad (54)$$

3.2.3.5. Application à la REM générale simplifiée d’un véhicule mixte à 4 sources électriques

La structure de commande développée est appliquée à la REM générale simplifiée d’un véhicule mixte à 4 sources électriques (Figure 3-47). Pour retrouver la REM particulière du métro électrique mixte étudié, il faut que les voies 2, 5 et 6 des aiguilleurs soient activées, les interrupteurs K_9 et K_{11} fermés (commande à 1) et l’interrupteur K_{10} ouvert (commande à 0).

Il est important de noter que les aiguilleurs utilisés en commande sont utilisés pour passer d’une commande à l’autre (cf. paragraphe précédent). Ils ne correspondent pas à l’inversion des aiguilleurs utilisés dans la REM générale.

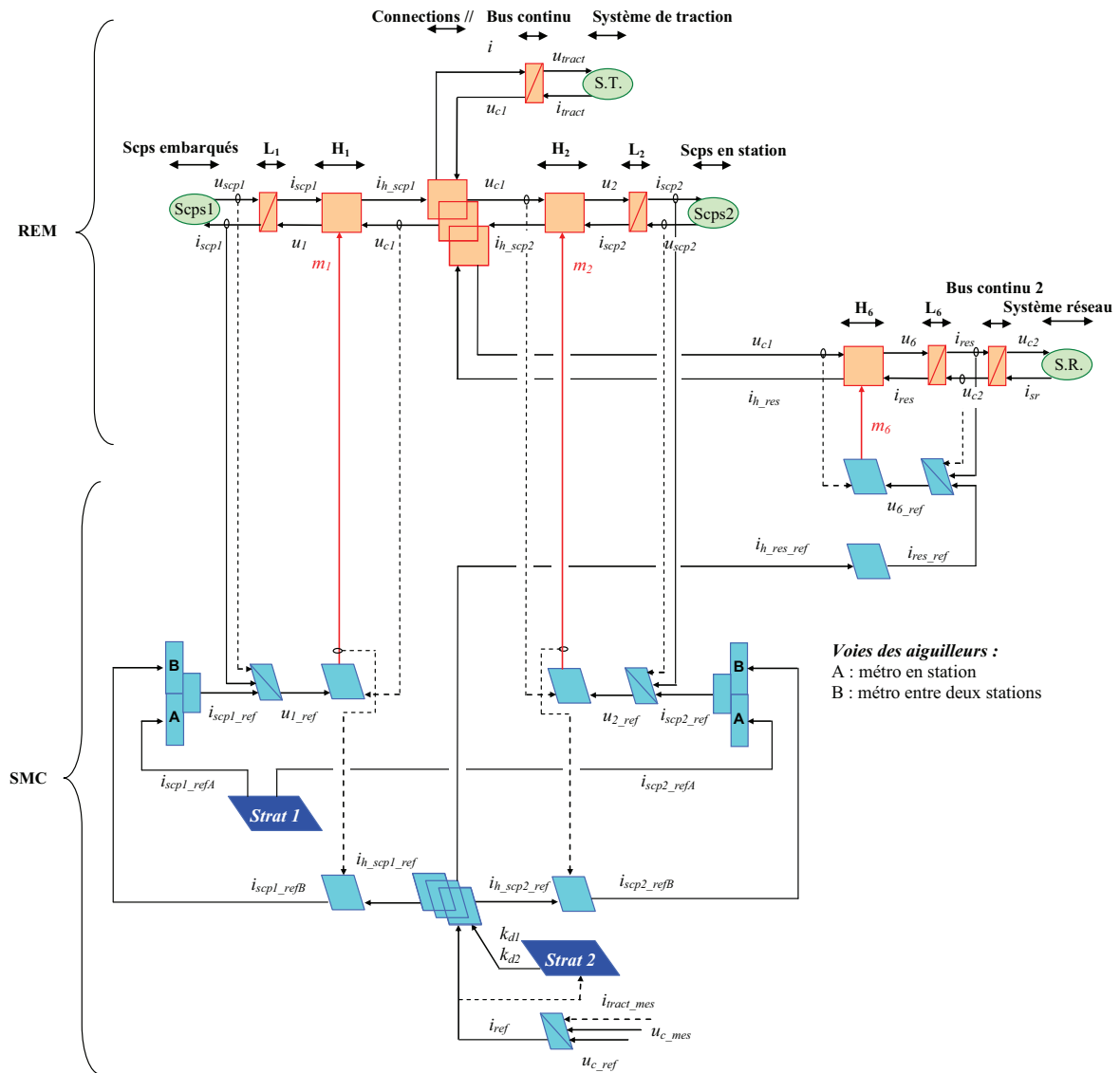


Figure 3-46. REM et structure de commande du métro

3.2.3.6. Validation de la commande par simulation

La stratégie de gestion de l'énergie mise en place va permettre de valider la structure de commande développée. Des résultats de simulation seront présentés.

❖ Stratégie de gestion de l'énergie en station

Lorsque le métro est en station, le système réseau assure le contrôle du bus continu, le banc de supercondensateurs en station recharge le banc de supercondensateurs embarqués, les voies de aiguilleurs A sont activées (cf. Figure 3-47).

Ce transfert de puissance entre les supercondensateurs en station et ceux embarqués peut s'effectuer de différentes manières et notamment à courant constant, à puissance constante, à puissance triangulaire [BARRADE 01, 02], [ALLEGRE 07]. Nous avons choisi ici d'effectuer le transfert d'énergie à courant i_{scp2} constant car c'est la stratégie la plus simple à mettre en œuvre. Cette stratégie va permettre de définir les courants de référence i_{scp1_ref} et i_{scp2_ref} en sortie du block stratégie *Strat 1*.

On souhaite que la puissance fournie par les supercondensateurs en station soit entièrement absorbée par les supercondensateurs embarqués, soit :

$$P_{scp1} = P_{scp2} \Leftrightarrow i_{scp1}u_{scp1} = i_{scp2}u_{scp2} \quad (55)$$

Pour la stratégie utilisée, le courant de référence i_{sc2_ref} étant maintenu constant, on en déduit l'expression du courant de référence i_{sc1_ref} :

$$i_{sc1_ref} = \frac{u_{sc2_mes}}{u_{sc1_mes}} i_{sc2_ref} = k i_{sc2_ref} \text{ avec } k = \frac{u_{sc2_mes}}{u_{sc1_mes}} \quad (56)$$

Dans l'équation (55), les pertes dues en particulier aux inductances n'ont pas été considérées. C'est donc le système réseau qui va devoir fournir l'énergie correspondant à ces pertes aux super-condensateurs embarqués.

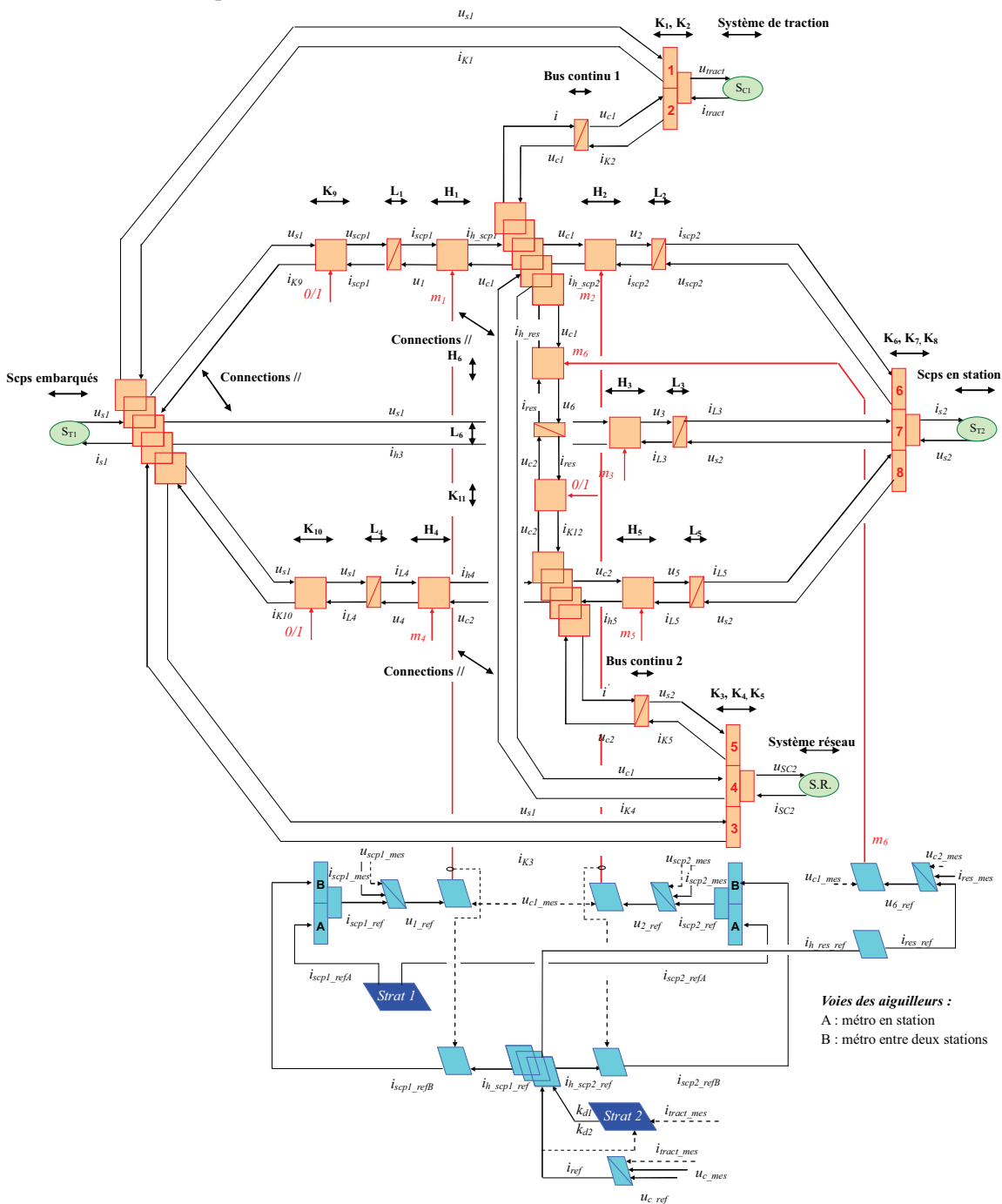


Figure 3-47. Application à la REM de l'architecture générale simplifiée d'un VE mixte à 4 sources électriques

❖ *Stratégie de gestion de l'énergie entre deux stations*

Lorsque le métro accélère sur le rail d'alimentation en début d'interstation, le banc de supercondensateurs en station et le système réseau fournissent l'énergie nécessaire à la traction du véhicule. Afin d'éviter que le réseau ne fournisse des courants trop importants, nous avons choisi un k_{d2} constant égal à 0,7. Ainsi lorsque le métro accélère sur le rail d'alimentation, 70% de la puissance de traction est fournie par les supercondensateurs en station et 30% par le système réseau.

Dès que le métro quitte le rail d'alimentation, les supercondensateurs embarqués prennent le relais jusqu'à la station suivante. Pendant toute la phase où le métro est entre deux stations, le banc de supercondensateurs embarqués contrôle la tension du bus continu.

❖ *Résultats de simulation*

Le système étudié est simulé sous Matlab-Simulink. La simulation est réalisée sur un trajet plat. La vitesse du véhicule est correctement régulée et suit le cycle de vitesse de référence (Figure 3-48.a). La tension de bus continu est bien contrôlée et maintenue à 1000 V lors des deux phases de fonctionnement du métro (Figure 3-48.e).

Au départ le métro est en station, le banc de supercondensateurs en station est complètement chargé ($u_{sc2} = 900 V$) et le banc de supercondensateurs embarqués complètement déchargé ($u_{sc1} = 900 V$). Le courant i_{sc2} est maintenu constant ($i_{sc2} = 1700 A$), pendant toute la phase de transfert d'énergie puis s'annule progressivement quand les supercondensateurs embarqués atteignent leur tension maximale $u_{sc1_max} = 900 V$ afin d'annuler la chute de tension liée à la résistance interne des supercondensateurs (cf. § 3.1.2.5) (Figure 3-48.d). Le coefficient k qui permet de définir le courant i_{sc1_ref} par rapport à i_{sc2_ref} diminue durant le transfert d'énergie (Figure 3-48.h), ainsi le courant i_{sc1_mes} est maximal en début de transfert puis diminue progressivement (Figure 3-48.d).

L'ensemble de la puissance fournie par les supercondensateurs en station est reçu par les supercondensateurs embarqués, tandis que le système réseau fournit la puissance permettant de maintenir le bus continu constant notamment en début de transfert.

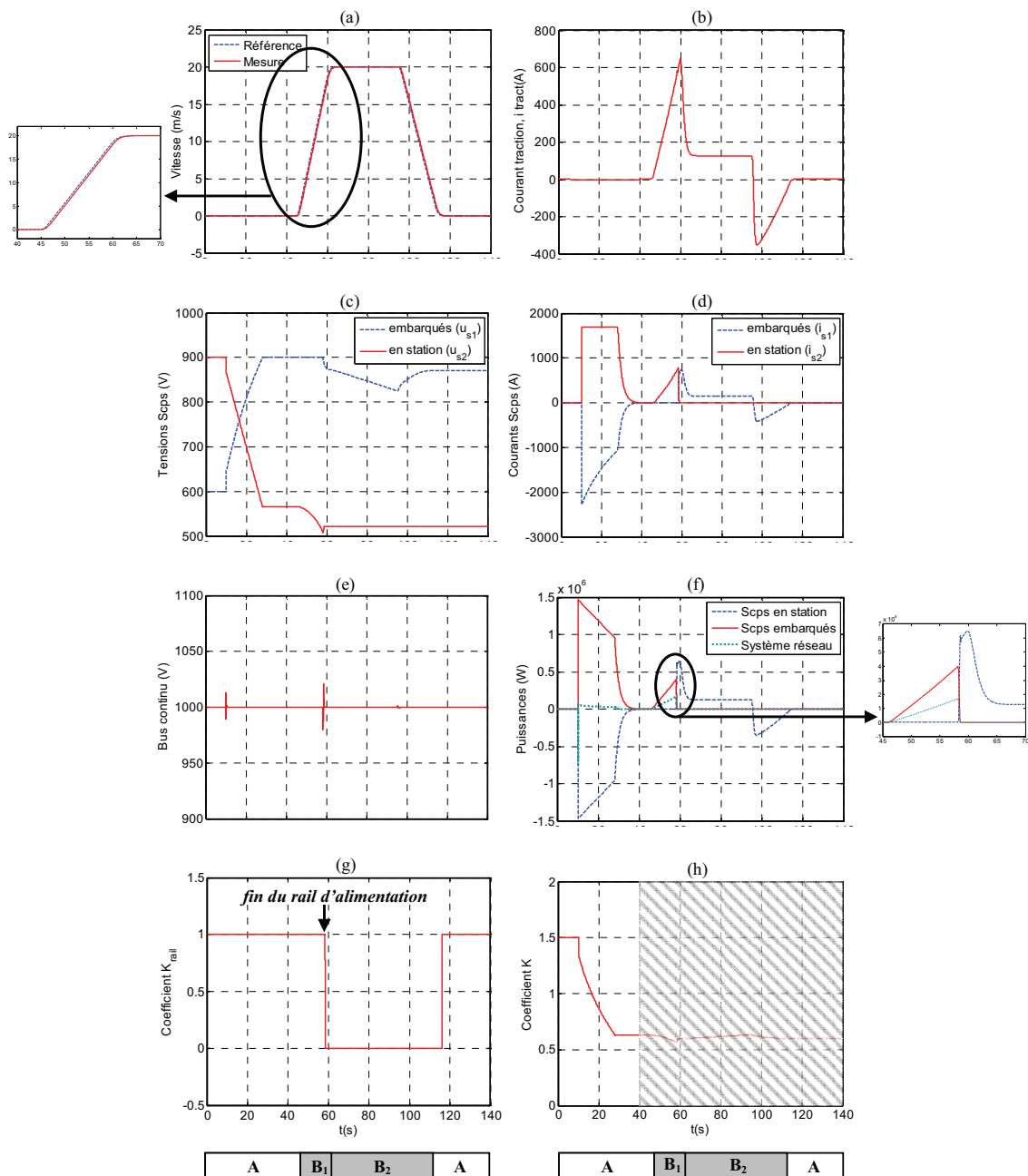
Lorsque le métro accélère sur le rail d'alimentation en début d'interstation, les supercondensateurs en station et le système réseau fournissent la puissance de traction du véhicule. En fin de rail d'alimentation ($k_{rail} = 0$) les supercondensateurs embarqués prennent le relais tout en maintenant le bus continu constant (Figure 3-48.e, f, g).

❖ *Conclusion*

Dans le paragraphe précédent, la commande a été étendue à une voiture hybride électrique mixte, véhicule mixte à 4 sources électriques et validée en simulation. Dans cette partie la commande a été étendue à un métro électrique mixte, véhicule mixte à 4 sources électriques dont 2 sont embarquées et 2 sont en stationnaires.

L'analyse du principe de fonctionnement du métro a montré que celui-ci devait être commandé différemment s'il était en station ou entre deux stations, car le nombre de sources électriques disponibles n'est pas le même. Une structure de commande, prenant en compte ces deux phases de fonctionnement, a été construite, et validée par simulation.

La structure de commande a également été validée partiellement en temps réel sur un banc expérimental à échelle réduite. Les expérimentations réalisées ne font pas appel aux quatre sources électriques disponibles dans le métro. Trois expérimentations ont été menées : une première sur le transfert de puissance en station entre les supercondensateurs en station et les supercondensateurs embarqués, sans contrôle du bus continu [ALLEGRE 07], une deuxième sur le métro entre deux stations, sans prendre en compte le rail d'alimentation [ALLEGRE 10b, 10c] et une troisième sur le métro entre deux stations, en prenant en compte le rail d'alimentation, mais sans considérer le système réseau. Plus de détails sur ces expérimentations sont données en Annexe H.



A : Métro en station
 B₁ : Métro entre 2 stations (sur rail d'alimentation)
 B₂ : Métro entre 2 stations (hors rail d'alimentation)

Figure 3-48. Résultats de simulation

3.3. Conclusion

Une méthodologie de modélisation de VEs mixte à 3 sources électriques a été développée et a été étendue à des véhicules mixtes à 4 sources électriques (VEH mixtes, VEs mixtes).

Dans ce chapitre, la commande de chaque véhicule présentée au chapitre 2 a été élaborée. La construction d'une structure de commande passe par différentes étapes: analyse du système et de sa REM, définition des objectifs de commande, établissement de chaînes de réglages, construction d'une structure de commande. Cette méthodologie a été suivie quelque soit le véhicule étudié. Elle présente l'avantage de bien distinguer structure de commande (commande locale) et stratégie de gestion de l'énergie (commande globale).

Pour les deux applications de VEs traitées il existe différentes possibilités de commande. Pour chacune d'entre elles, une structure de commande a été établie en différenciant bien le contrôle local de chaque sous-système et la gestion globale de l'ensemble (stratégie). La superposition de ces différentes possibilités a permis d'obtenir une structure de commande prenant en compte tout les cas envisageables. La structure de commande de la voiture électrique mixte a été validée par simulation et en temps réel et celle du microbus électrique mixte par simulation et en expérimentation sur le véhicule réel. Les stratégies de gestion de l'énergie mises en place sont relativement simples. Des stratégies plus complexes seront proposées au chapitre suivant pour les VEs mixtes.

Pour les deux applications de véhicules mixtes à 4 sources électriques, l'ensemble des possibilités de commande n'a pas été traité. Par contre, ces deux applications mettent en œuvre différents modes de fonctionnement. Pour chacun d'entre eux, une structure de commande a été établie. De la même manière, leur superposition a permis d'obtenir une structure de commande prenant en compte l'ensemble des modes de fonctionnement. La structure de commande de la voiture électrique hybride mixte a été validée par simulation et celle du métro électrique mixte par simulation et partiellement en temps réel.

Le principe de superposition mis en place, pour prendre en compte dans la structure de commande les différentes possibilités de commande ou les différents modes de fonctionnement du système, a été appliqué à des véhicules, certes différents mais spécifiques. Il serait intéressant de voir s'il est applicable à d'autres véhicules, voire d'autres applications.

4

Influence des stratégies de gestion de l'énergie

Les commandes de différents véhicules mixtes ont été développées au chapitre 3 et validées en simulation et en expérimentation en utilisant des stratégies simples de gestion de l'énergie.

L'objectif de ce chapitre consiste à étudier l'influence des stratégies de gestion de l'énergie pour un véhicule mixte, notamment sur les trois points suivants : consommation de l'énergie électrique de la batterie, durée de vie de la batterie, dimensionnement de la batterie. L'étude sera réalisée, en particulier, sur la voiture électrique mixte batteries / supercondensateurs étudiée dans les chapitres précédents. Pour évaluer l'apport des supercondensateurs, ce véhicule sera comparé à un véhicule de référence, une voiture électrique utilisant uniquement des batteries.

4.1. Cadre de l'étude

4.1.1. Approche

L'idée d'associer des batteries et des supercondensateurs a pour objectif d'obtenir un Système de Stockage d'Energie (SSE) électrique présentant de meilleures performances notamment en terme de consommation électrique, de dimensionnement et de durée de vie des batteries qu'un système uniquement composée de batteries, comme c'est le cas de la plupart des VEs et des VEHS sur le marché automobile actuel (cf. Chapitre 1, § 1.1.3.).

Etant donné que l'on souhaite évaluer l'apport des supercondensateurs associés aux batteries, deux véhicules vont être étudiés : un VE avec batteries et un VE mixte avec batteries / supercondensateurs (Figure 4-1).

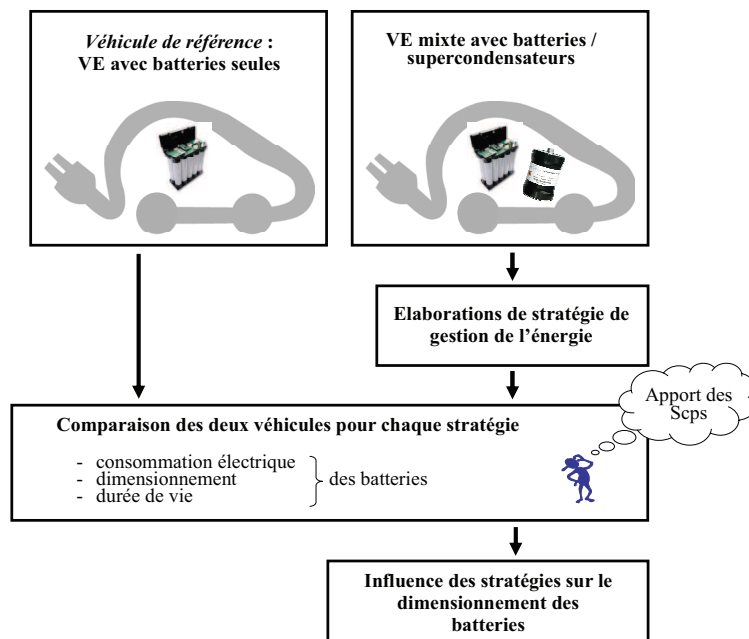


Figure 4-1.Approche

Le VE mixte avec batteries / supercondensateurs est la voiture électrique mixte présentée aux chapitres 2 et 3 (Figure 4-2). Sa REM et sa structure de commande sont rappelées à la Figure 4-3. La structure de commande du SSE électrique mixte ne prend en compte que la commande du cas 1 (cf. § 3.1.2.2.). La commande en vitesse du véhicule est incluse dans la source électrique équivalente du système de traction.

Le VE avec batteries, qui constituera notre véhicule de référence, est la même voiture électrique sans le banc de supercondensateurs ; les batteries assurent seules la traction du véhicule (Figure 4-4).

Etant donné que la source de traction est représentée par une source électrique équivalente et que les batteries sont également représentées par une source électrique, la REM du second véhicule se ramène à deux sources électriques connectées en parallèle (Figure 4-5).

Les deux véhicules seront ensuite comparés sur certains critères. Pour le VE avec batteries, les batteries assurent à elles seules la traction du véhicule. Pour le VE mixte étudié, différentes stratégies de gestion de l'énergie vont être étudiées. Ce véhicule va être comparé, pour chaque stratégie développée, au VE avec batteries.

Pour que cette comparaison soit significative, nous avons adopté les deux hypothèses suivantes. Premièrement, nous avons choisi de prendre des bancs de batteries identiques pour les véhicules. En d'autres termes, le banc de batteries va être dimensionné pour le cas le plus contraignant, et sera ensuite utilisé pour les deux véhicules. Ce dimensionnement va être réalisé pour le VE avec batteries puisque c'est le véhicule qui les utilise le plus. Deuxièmement, nous nous sommes fixés comme contrainte que l'état de charge (SOC) du banc de supercondensateurs initial soit identique à son SOC final. Si ce n'est pas le cas en fin de parcours, il faudra trouver un moyen de recharger les supercondensateurs.

Nous allons voir ensuite comment ces stratégies ont une influence sur les différents critères étudiés. Une étude sera menée en particulier sur l'influence des stratégies sur le dimensionnement des batteries

4.1.2. Dimensionnement des bancs de batteries et supercondensateurs

4.1.2.1. Dimensionnement du banc de batteries

❖ *Approche*

Ce dimensionnement va être réalisé pour le VE avec batteries, puisque c'est le véhicule qui utilise le plus les batteries.

Pour dimensionner le banc de batteries, on se fixe un cahier des charges. On souhaite que le banc de batteries :

- assure une autonomie de 100 km au véhicule
- soit capable d'absorber l'ensemble de l'énergie de récupération lors des phases de décélération.

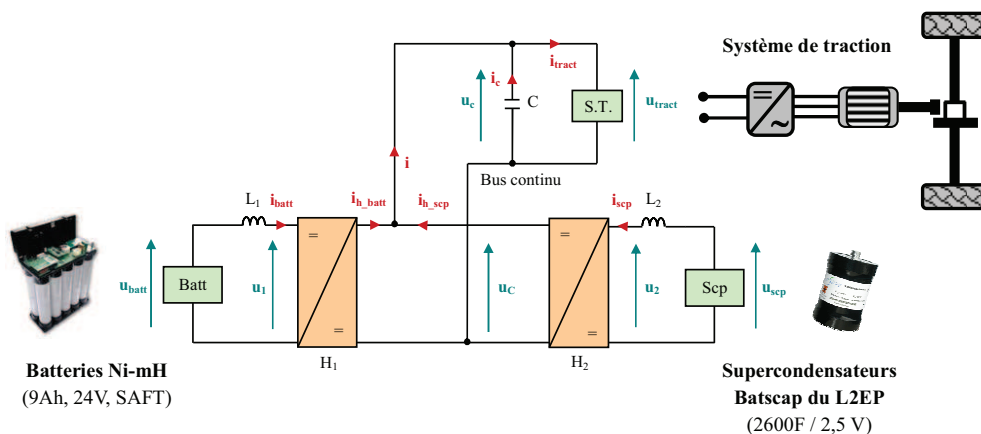


Figure 4-2. Architecture de la voiture électrique mixte

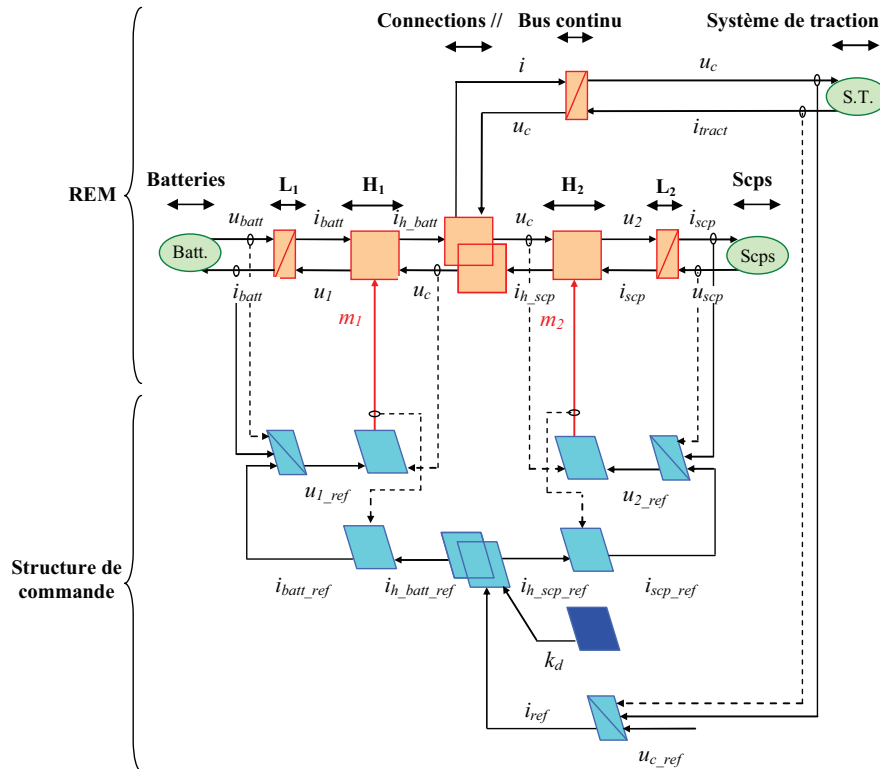


Figure 4-3. REM et SMC de la voiture électrique mixte

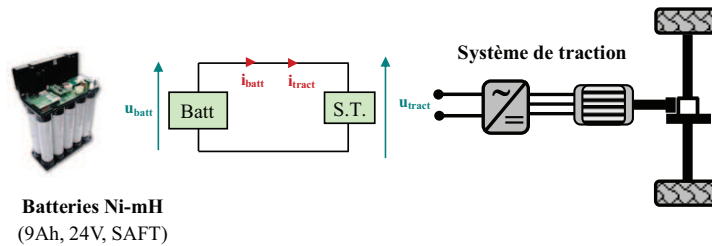


Figure 4-4. Architecture de la voiture électrique, véhicule de référence

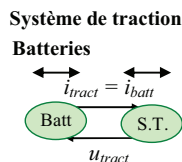


Figure 4-5. REM de la voiture électrique, véhicule de référence

Cette deuxième condition, bien que très contraignante pour le dimensionnement du banc de batteries a l'avantage de permettre une méthode de dimensionnement relativement simple.

L'approche que nous avons choisie pour effectuer le dimensionnement du banc de batteries se base sur un cycle représentatif de l'usage du véhicule. Le véhicule répète le cycle choisi, le nombre de fois nécessaire pour atteindre 100 km (Figure 4-6). Le dimensionnement du banc de batteries va donc être conditionné par E_{tract_tot} , P_{tract_max} et P_{tract_min} (Figure 4-6.b).

Pour notre étude, nous avons choisi un cycle urbain normalisé ECE. Sur un cycle, le véhicule parcourt environ 1 km, il faut donc 100 cycles pour atteindre 100 km. Le trajet étudié est un cas simple mais restrictif. En effet, les énergies et puissances mises en œuvre pour cycle extra-urbain auraient été plus importantes. Cependant il est important de noter que la méthodologie de dimensionnement qui va être développée, est applicable à n'importe quel trajet.

Si le dimensionnement en énergie est plus contraignant que celui en puissance, les batteries seront dimensionnées en énergie. A l'inverse, si le dimensionnement en puissance est plus contraignant que celui en énergie, les batteries seront dimensionnées en puissance. Il est important de noter que l'approche de dimensionnement utilisée ici est très fortement dépendante du trajet dimensionnant, ainsi que de la technologie et du type de batteries utilisées (batteries de puissance, batteries d'énergie) (Tableau 4-1).

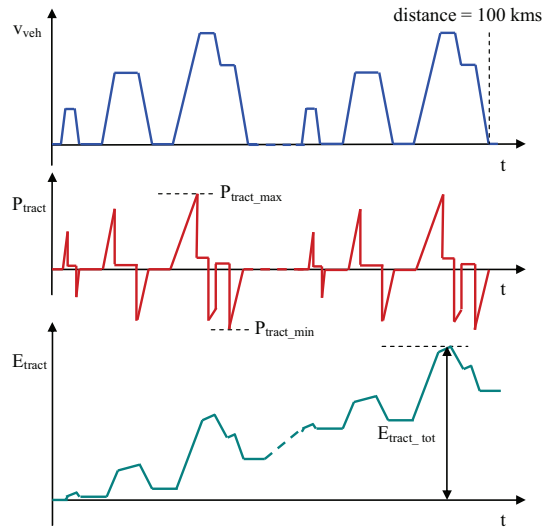


Figure 4-6. Approche du dimensionnement du banc de batteries

Tableau 4-1. Batteries Ni-MH et Li-ion utilisées pour des applications VE et VEHs (www.saft.com)

Technologie de batteries	Type de batteries	Energie massique (Wh / kg)	Puissance massique (W / kg)
Ni-MH	Energie	137	150
Ni-MH	Puissance	50	520
Li-ion	Energie	110	533
Li-ion	Puissance	75	1100

Pour notre application, les batteries utilisées sont des batteries Ni-MH, caractérisées par une forte densité d'énergie (cf. Annexes D). Les énergies nécessaires pour un dimensionnement en puissance, en charge et en décharge, vont être calculées ainsi que celle nécessaire à un dimensionnement en énergie. Le dimensionnement le plus contraignant sera celui pour lequel, l'énergie à stocker sera la plus élevée.

❖ *Dimensionnement le plus contraignant*

Pour un dimensionnement du banc de batteries en énergie, l'énergie maximale stockée dans les batteries E_{batt_stockE} exprimée en Wh est définie à partir de l'énergie totale de traction E_{tract_tot} et de la profondeur de décharge maximale DOD_{batt} que l'on s'autorise pour le banc de batteries :

$$E_{batt_stockE} = \frac{E_{tract_tot}}{DOD_{batt}} \text{ avec } E_{tract_tot} = |E_{tract_max} - E_{tract_min}| \tag{57}$$

Où E_{tract_max} est l'énergie maximale et E_{tract_min} , l'énergie minimale de traction.

Pour un dimensionnement du banc de batteries en puissance, la puissance maximale fournie par le banc de batteries en décharge P_{battD} , et la puissance maximale absorbée par le banc de batteries en

charge P_{battC} , sont obtenues à partir du maximum et du minimum de la puissance de traction P_{tract} . En choisissant une convention "générateur" pour le banc de batteries, on a :

$$\begin{cases} P_{battD} = P_{tract_max} \\ P_{battC} = P_{tract_min} \end{cases} \quad (58)$$

Où P_{tract_max} est le maximum et P_{tract_min} le minimum de la puissance de traction.

D'après les données constructeurs des batteries Ni-MH utilisées (cf. Annexes D), on fixe les courants maximaux de décharge et de charge tels que :

$$\begin{cases} i_{el_battD} = 7,5C_{el_batt}h^{-1} \\ i_{el_battC} = 1C_{el_batt}h^{-1} \end{cases} \quad (59)$$

Où C_{el_batt} est la capacité de la batterie exprimée en Ah.

Les temps de décharge β_{dech} et de charge β_{ch} minimum de la batterie sous les courants de décharge i_{el_battD} est de charge i_{el_battC} sont définis par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \beta_{dech} = \frac{C_{el_batt}}{i_{el_battD}} \\ \beta_{ch} = \frac{C_{el_batt}}{i_{el_battC}} \end{cases} \quad (60)$$

Pour les batteries Ni-MH utilisées, sachant que $C_{el_batt} = 9 \text{ Ah}$, on trouve $\beta_{dech} = 0,13h$ et $\beta_{ch} = 1h$.

Pour un dimensionnement en puissance, basée sur la décharge du banc de batteries, l'expression de l'énergie maximale stockée dans les batteries $E_{batt_stockP_D}$ exprimée en Wh est la suivante :

$$E_{batt_stockP_D} = \beta_{dech} P_{battD} \quad (61)$$

De même, pour un dimensionnement en puissance, basée sur la charge du banc de batteries, l'expression de l'énergie maximale stockée dans les batteries $E_{batt_stockP_C}$ exprimée en Wh est la suivante :

$$E_{batt_stockP_C} = -\beta_{ch} P_{battC} \quad (62)$$

Quelque soit le dimensionnement du banc de batterie, la relation suivante doit être vérifiée :

$$E_{batt_stockE} \geq \max(\beta_{dech} P_{battD}, -\beta_{ch} P_{battC}) \quad (63)$$

Cette inéquation permet de délimiter dans le plan (E_{batt_stockE} , P_{batt}) le domaine de validité du dimensionnement des batteries (Figure 4-7) [AKLI 08].

Pour une application véhicule électrique, on se fixe généralement une profondeur de décharge maximale $DOD_{batt} = 80\%$. Ainsi, pour le trajet considéré (100 cycles ECE), on obtient : $P_{battD} \approx 18 \text{ kW}$, $P_{battC} \approx 14 \text{ kW}$, $E_{tract_tot} \approx 9 \text{ kWh}$, $E_{batt_stockE} \approx 11 \text{ kWh}$.

La relation (63) n'est pas vérifiée puisque l'on a $E_{batt_stockE} \approx 11 \text{ kWh}$ inférieur à $\beta_{dech} P_{battD} \approx 2 \text{ kWh}$ et $\beta_{ch} P_{battC} = 14 \text{ kWh}$.

Cela signifie qu'un dimensionnement en énergie ne permet pas de fournir les besoins en puissance du trajet considéré. Il est donc nécessaire de dimensionner le banc de batteries en puissance en

augmentant l'énergie stockée, de telle façon à ce qu'il puisse fournir les puissances crêtes de charge et de décharge. Ainsi, pour couvrir la puissance crête de décharge, il faut stoker une énergie $E_{batt_stockP_D} = 2 kWh$, et pour couvrir la puissance crête de charge, une énergie $E_{batt_stockP_C} = 14 kWh$.

Cette première étude ne visant pas à réaliser un dimensionnement optimal du banc batteries, nous avons fait le choix de le dimensionner de façon à ce qu'il puisse absorber la puissance de crête de charge, bien que ce dimensionnement nécessite d'augmenter fortement l'énergie stockée dans le banc de batteries.

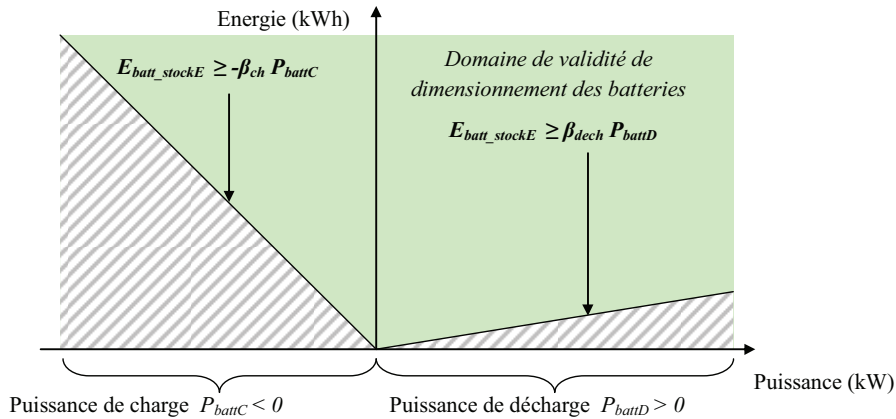


Figure 4-7. Graphe des contraintes en dimensionnement d'une batterie

❖ *Calcul du nombre de batteries*

Le nombre de batteries N_{batt} est obtenu à partir de l'énergie maximale stockée dans le banc batteries E_{batt_stock} et de l'énergie stockable dans une batterie E_{el_batt} :

$$N_{batt} = \frac{E_{batt_stock}}{E_{el_batt}} \text{ avec } E_{el_batt} \equiv C_{batt} u_{el_battN}, \text{ et pour notre cas } E_{batt_stock} = E_{batt_stockP_C} \quad (64)$$

Où u_{el_battN} est la tension nominale de la batterie.

La tension maximale du banc de batterie u_{batt_max} permet de fixer le nombre de batteries en série N_{batt_s} , et d'en déduire le nombre de batteries en parallèle N_{batt_p} :

$$N_{batt_s} = \frac{u_{batt_max}}{u_{el_batt_max}} \Rightarrow N_{batt_p} = \frac{N_{batt}}{N_{batt_s}} \quad (65)$$

Où $u_{el_batt_max}$ est la tension maximale de la batterie.

Nous avons fixé le bus continu u_c à 250 V. Pour les batteries Ni-MH utilisées, sachant que $u_{el_batt_max} = 30 V$, pour obtenir un chiffre rond pour le nombre de batteries en série, nous avons fixé $u_{batt_max} = 210V$. Nous obtenons $N_{batt_s} = 7$ et en arrondissant au nombre entier supérieur : $N_{batt_p} = 10$ et $N_{batt} = 70$.

Il est important de noter qu'avec ce dimensionnement du banc de batteries, le véhicule a une autonomie plus importante (≈ 220 km) que celle fixée par le cahier des charges. Nous allons voir au § 4.4 que l'ajout des supercondensateurs va permettre de redimensionner le banc de batteries et d'avoir un dimensionnement plus réaliste qui respecte le cahier des charges.

4.1.2.2. Dimensionnement du banc de supercondensateurs

❖ Démarche

Nous avons choisi de dimensionner le banc de supercondensateurs en puissance puisque un des objectifs d'une association batteries / supercondensateurs est que les supercondensateurs fournissent et absorbent les pics de puissance.

❖ Dimensionnement en puissance

Contrairement aux batteries, les supercondensateurs disposent de la même puissance en charge et en décharge. La puissance d'un supercondensateur est donnée, selon les données des constructeurs, par la relation suivante (cf. Annexes E) [AKLI 08] :

$$P_{el_scp} = \frac{0,12 u_{el_scpN}^2}{R_{el_scp}} \quad (66)$$

Où u_{el_scpN} est la tension nominale des supercondensateurs, et R_{el_scp} , la résistance série d'un supercondensateur.

❖ Nombre de supercondensateurs

Le nombre de supercondensateurs est déduit de la puissance maximale demandée par le banc de supercondensateurs P_{scp} sur le trajet considéré :

$$N_{scp} = \frac{P_{scp}}{P_{el_scp}} \text{ avec } P_{scp} = \max(P_{scpD}, P_{scpC}) \quad (67)$$

Où, P_{scpD} , est la puissance maximale demandée par le banc de supercondensateurs en décharge et P_{scpC} , la puissance maximale absorbée par le banc de supercondensateurs en charge.

La tension maximale du banc de supercondensateurs u_{scp_max} permet de fixer le nombre de supercondensateurs en série N_{scp_s} , et d'en déduire le nombre de supercondensateurs en parallèle N_{scp_p} :

$$N_{scp_s} = \frac{u_{scp_max}}{u_{el_scp_max}} \Rightarrow N_{scp_p} = \frac{N_{scp}}{N_{scp_s}} \quad (68)$$

Où $u_{el_scp_max}$ est la tension maximale des supercondensateurs.

Le bus continu u_c a été fixé à $250 V$. Pour les supercondensateurs Batscap utilisés ($2600F / 2,7V$), sachant que $u_{el_scp_max} = 2,7V$, pour obtenir un chiffre rond pour le nombre de supercondensateurs en série, nous avons fixé $u_{scp_max} = 216V$. Nous obtenons $N_{scp_s} = 80$ et en arrondissant au nombre entier supérieur : $N_{scp_p} = 1$ et $N_{scp} = 80$. Il est important de noter que le banc de supercondensateurs est surdimensionné en puissance. En effet, avec le nombre de supercondensateurs en série nécessaires pour atteindre la tension u_{scp_max} , les besoins en puissance du trajet considéré sont largement couverts.

4.1.3. Critères de comparaison

4.1.3.1. Critère de consommation électrique

Pour un VE, un point important est la consommation d'énergie électrique de la batterie.

La charge électrique consommée par le banc de batterie ΔQ_{batt_consom} exprimée en Ah entre la fin du parcours Q_{batt_f} et le début du parcours ΔQ_{batt_i} nous donne une information sur cette consommation :

$$Q_{batt}(t) = Q_{batt_i} + \int \frac{i_{batt}(t)}{3600} dt \quad (69)$$

$$\Delta Q_{batt_consom} = Q_{batt_f} - Q_{batt_i} \quad (70)$$

L'énergie calculée en sortie du banc de batteries $E_{batt_consom} = E_{batt_f} - E_{batt_i}$ donne également une information sur la consommation électrique. Cependant, cette énergie est l'énergie batterie utile et ne prend pas en compte les pertes au sein de la batterie. C'est la raison pour laquelle nous avons préféré prendre l'indicateur ΔQ_{batt_consom} qui lui prend en compte ces pertes.

4.1.3.2. Critères de durée de vie

L'usage répété des batteries fait apparaître des phénomènes de vieillissement (dégradation des matériaux, de la structure...). Les performances de batteries se détériorent lentement : diminution de la capacité nominale, augmentation rapide de la température durant l'utilisation, diminution de l'acceptation en recharge, diminution de la tension aux bornes de la batterie, augmentation du phénomène d'autodécharge [SERRAO 05], [MARANO 09].

Les constructeurs estiment qu'une batterie est en fin de vie lorsque, après l'avoir chargée et déchargée des centaines de fois sur un même cycle de courant, elle n'est capable de fournir que 80% de sa capacité nominale [SERRAO 05]. En réalité pour une application véhicule, étant donné que les cycles de charge et décharge ne sont pas définis à l'avance et ne sont pas identiques, puisqu'ils dépendent de l'usage que l'on fait du véhicule, il est plus difficile d'estimer la durée de vie d'une batterie [SERRAO 05], [MARANO 09]. Dans notre étude nous allons nous intéresser aux paramètres les plus influents (température, gamme d'état de charge balayée et profil de sollicitations en courant) qui nous donneront une information sur la durée de vie de la batterie.

Le courant efficace d'une batterie $I_{el_batt_eff}$ sur le trajet considéré donne une idée sur les échauffements subis par la batterie et donc sur l'augmentation en température de celle-ci. Ainsi, plus le courant efficace $I_{el_batt_eff}$ est important, plus la température au sein d'une batterie augmente, plus en général la durée de vie de la batterie est réduite [MARANO 09].

$$I_{el_batt_eff}^2 = \frac{I}{T_{trajet}} \int_0^{T_{test}} i_{batt}^2 dt \quad (71)$$

Où T_{trajet} est la durée du trajet testé.

La différence d'état de charge de la batterie $\Delta SOC_{batt_balayé}$ entre l'état de charge maximal SOC_{batt_max} et l'état de charge minimal SOC_{batt_min} nous donne une information sur la gamme de d'état de charge balayée :

$$\Delta SOC_{batt_balayé}(\%) = SOC_{batt_max}(\%) - SOC_{batt_min}(\%) \quad (72)$$

Ainsi, plus $\Delta SOC_{batt_balayé}$ est important, plus la gamme d'état de charge balayée est importante, plus la durée de vie des batteries est réduite.

Enfin, la distribution du courant des batteries, sur l'ensemble du trajet, donne une information sur le profil de sollicitations en courant des batteries. Cette distribution permet de comptabiliser les quantités de charge (en Ah) dépensées dans les différentes classes de courant et sera présentée à l'aide d'histogrammes. Ainsi, plus la distribution du courant dans les forts courants est importante, plus la durée de vie des batteries est réduite.

4.1.3.3. Critères de dimensionnement

Généralement pour les VEs, le dimensionnement le plus contraignant pour les batteries est le dimensionnement en énergie puisque le véhicule doit avoir l'autonomie la plus grande possible. Cependant suivant l'usage du véhicule, le type de technologie et le type de batteries utilisées, il est possible que les batteries soient dimensionnées en puissance, c'est le cas ici pour notre application

L'énergie à stocker dans le banc batteries pour satisfaire les besoins en énergie E_{stockE} , donne une information sur son dimensionnement en énergie. Cette énergie est l'énergie fournie par le banc de batteries sur le trajet considéré en tenant compte de sa profondeur de décharge maximale (cf. § 4.1.2.1).

$$E_{batt_stockE} = \frac{|E_{batt_max} - E_{batt_min}|}{DOD_{batt}} \quad (73)$$

Où E_{batt_max} est l'énergie maximale fournie par le banc de batteries et E_{batt_min} l'énergie minimale.

Il est important de noter que l'énergie à stocker E_{batt_stockE} ne donne pas d'information sur l'énergie consommée dans le banc de batteries E_{batt_consom} (Figure 4-8). En effet, l'énergie E_{batt_max} peut être différente de l'énergie E_{batt_f} , tout comme l'énergie E_{batt_min} peut être différente de l'énergie E_{batt_i} .

L'énergie à stocker dans le banc batteries, pour satisfaire les besoins en puissance, donne une information sur le dimensionnement en puissance. Cette énergie est l'énergie nécessaire au banc de batteries pour fournir et absorber la puissance maximale en décharge et en charge sur le trajet considéré, en tenant compte de sa profondeur de décharge maximale (cf. § 4.1.2.1). Pour notre étude, nous dissocierons l'énergie à stocker pour satisfaire les besoins en puissance en décharge E_{stockP_D} , à celle pour satisfaire les besoins en puissance en charge E_{stockP_C} (cf. (61)et (62)) Ces énergies à stocker seront exprimées en Wh.

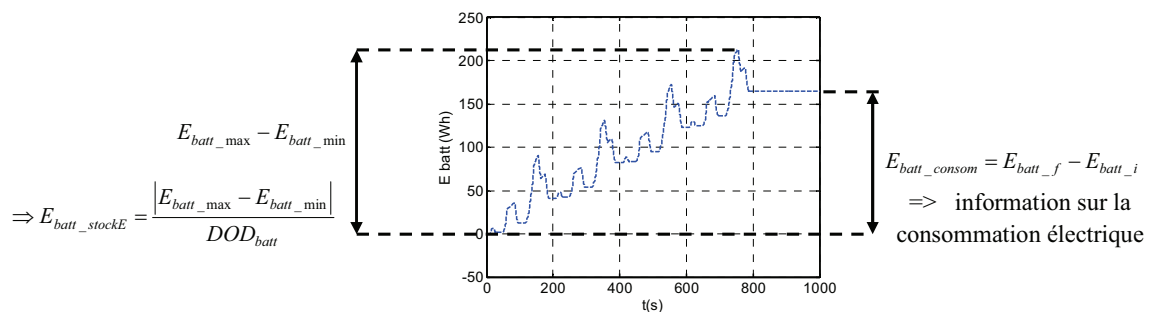


Figure 4-8. Différence entre énergie à stocker et énergie consommée par le banc de batteries

4.2. Stratégies de base

Différentes stratégie de gestion de l'énergie vont être mises en place pour la voiture électrique mixte. Ce véhicule sera ensuite comparé pour chaque stratégie, sur l'ensemble des critères définis précédemment, à la voiture électrique utilisant uniquement des batteries.

4.2.1. Généralités

Les objectifs et les type de stratégie de gestion de l'énergie d'une association batteries / supercondensateurs vont être définis. Nous positionnerons ensuite notre approche par rapport aux stratégies existantes.

4.2.1.1. Objectifs

La gestion du flux de puissance entre les batteries et les supercondensateurs va être déterminante pour que cette association soit intéressante. Ainsi, la stratégie de gestion de l'énergie doit être choisie de façon à utiliser au mieux chacun des deux SSE électriques.

Les batteries se caractérisent par une forte densité d'énergie, par contre leur puissance massique et leur cyclabilité sont généralement faibles. Les batteries doivent donc être utilisées pour fournir et absorber la puissance de traction moyenne du véhicule. Ainsi, les pertes et les contraintes en courant devraient être réduites et permettre de réduire la consommation électrique et le dimensionnement du banc de batterie et également d'augmenter leur durée de vie.

Les supercondensateurs supportent bien le cyclage et se caractérisent par une forte densité de puissance, par contre leur énergie massique est faible. Ils doivent donc être utilisés pour assister les batteries en fournissant et en absorbant les pics de la puissance de traction.

En résumé, l'objectif des stratégies de gestion de l'énergie d'un SSE électrique mixte batteries / supercondensateurs vise à ce que les batteries fournissent et absorbent la puissance moyenne de traction et les supercondensateurs les pics de puissance.

En pratique, il n'est pas facile d'atteindre cet objectif. En effet, le calcul de la puissance moyenne de traction nécessite de connaître l'évolution de la puissance de traction au cours de l'ensemble du trajet. De plus, le partage du flux de puissance entre les batteries et les supercondensateurs va également dépendre de l'état de charge de chacun des deux systèmes de stockage.

4.2.1.2. Classification des stratégies de gestion de l'énergie

De nombreux travaux ont été effectués sur la gestion de l'énergie pour une association batteries / supercondensateurs. On peut classer les stratégies développées en deux principales catégories : les stratégies basées sur des règles et les stratégies basées sur l'optimisation [SALMASI 07], [GUIDI 09].

Les stratégies basées sur des règles ont la particularité de fournir rapidement une solution réalisable. Les règles utilisées peuvent être déterministes, ou non déterministes. Les règles déterministes sont définies après analyse et expertise du système. Par exemple, afin de ne pas trop solliciter les batteries et prolonger leur durée de vie, une des règles pourrait consister à limiter les courants fournis ou reçus par les batteries [ORTUZAR 07]. De nombreux travaux sur l'association batteries / supercondensateurs utilisent des règles déterministes [PAY 03], [ORTUZAR 07], [CARTER 08], [ZHANG 08], [GUIDI 09]. Les règles non déterministes peuvent utiliser la logique floue [JINRUI 06], [FERREIRA 07] ou les réseaux de neurones [MORENO 06], [ORTUZAR 07].

Ces stratégies basées sur des règles ont l'avantage d'être généralement facilement implantables en temps réel et ne nécessitent pas, a priori, de connaître le trajet pas avance [SALMASI 07]. Par contre la solution résultant de ce type de stratégie n'est pas nécessairement optimale.

Les stratégies basées sur l'optimisation se partagent en deux sous catégories : les stratégies utilisant une optimisation globale et celles utilisant une optimisation applicable en temps réel. Les stratégies utilisant une optimisation globale, se basent sur un ou plusieurs objectifs à minimiser, par exemple pour notre application, la minimisation des pertes dans le SSE électrique mixte [AYAD 07]. Le ou les objectifs à minimiser sont exprimés sous forme de fonctions. Une première méthode consiste à utiliser les multiplicateurs de Lagrange et l'opérateur hamiltonien pour minimiser ces fonctions. D'autres méthodes, comme la programmation dynamique peuvent être utilisées [VINOT 10]. Le processus d'optimisation prend en compte les contraintes physiques du système : limitation en tension des supercondensateurs, limitations en courant des batteries... L'avantage de ce type de stratégies est qu'elle donne théoriquement une solution optimale. Cependant, les processus d'optimisation étant complexes, ce type de stratégie n'est pas applicable en temps réel et nécessitent de connaître le trajet

effectué par avance. Les stratégies qui utilisent une optimisation applicable en temps réel sont basées sur l'optimisation globale, mais en négligeant certaines contraintes afin d'alléger le processus d'optimisation. Ainsi, elles peuvent être applicables en temps réel. Cependant, la solution obtenue n'est pas nécessairement optimale [KERMANI 09].

4.2.1.3. Notre approche

Différentes stratégies de gestion de l'énergie, basées sur des règles déterministes, vont être proposées et vont tenter de s'approcher de l'objectif initial de gestion de l'énergie d'un SSE mixte batteries / supercondensateurs. Ces stratégies ont l'avantage de pouvoir être appliquées en temps réel, quelque soit le trajet effectué par le véhicule.

Pour l'ensemble de ces stratégies, si le banc de supercondensateurs atteint sa tension minimale, ou sa tension maximale, les batteries prennent progressivement le relais (Figure 4-9).

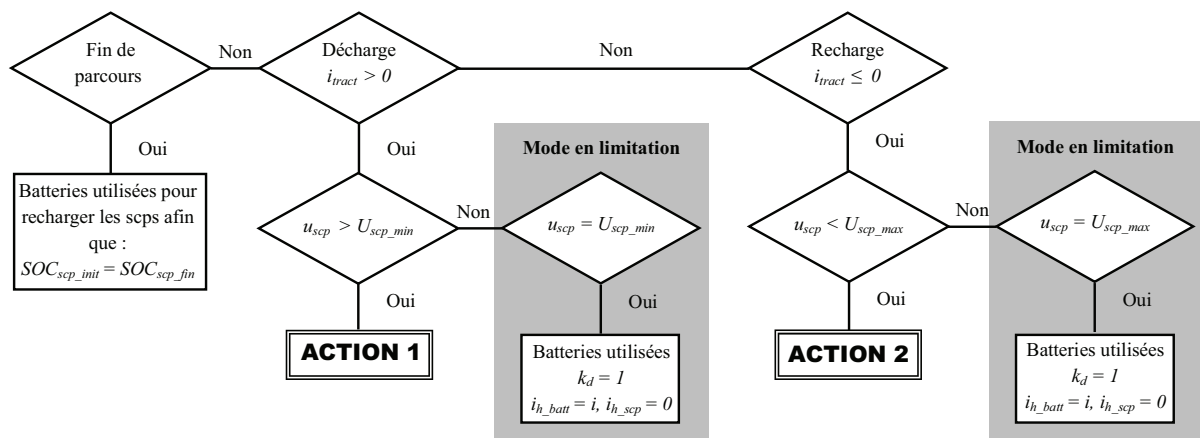


Figure 4-9. Principe des stratégies de gestion de l'énergie

Ces phases de transition s'appuient sur la stratégie avec « transition douce » présentée au chapitre 3 (cf. §. 3.1.2.5.). Nous qualifierons de modes de limitation, les modes pour lesquels le banc de supercondensateurs ne peut pas être utilisé parce qu'il est en limitation de tension.

Pour pouvoir comparer les deux véhicules étudiés par la suite, le banc de supercondensateurs du VE mixte est entièrement rechargé par le banc de batteries en fin de parcours, de façon à ce que son état de charge initial soit égal à son état de charge final (Figure 4-9). Cette recharge s'effectue à courant constant.

Le diagramme de la Figure 4-9 va être utilisé pour chaque stratégie de gestion de l'énergie et les actions 1 et 2 seront définies pour chacune d'entre elles. Pour ne pas alourdir la Figure 4-9, les phases avec transition douce, quand les supercondensateurs sont en limitation de tension, ne sont pas explicitées (cf. chapitre 3, §. 3.1.2.5.).

4.2.2. Mise en place de stratégies de base

Les principes de 4 stratégies de gestion de l'énergie de base vont être présentés : stratégie fonction des résistances internes, stratégie fonction de l'accélération, stratégie de filtrage et stratégie avec saturation du courant.

4.2.2.1. Positionnement

La stratégie « de filtrage » se base sur les travaux menés par [CHAPOULIE 99] et [AKLI 08] qui utilisent l'approche fréquentielle pour dimensionner les bancs de batteries et de supercondensateurs d'un véhicule solaire et d'une locomotive électrique hybride, respectivement. Cette approche a égale-

ment été utilisée pour la commande d'un véhicule avec batteries / supercondensateurs / pile à combustible [THOUNTHONG 09].

Le principe de la stratégie « avec saturation courant » est utilisé dans de nombreux travaux, mais généralement le courant de saturation du courant du banc de batteries est maintenu constant sur la durée du trajet considéré [CARTER 08], [JINRUI 06]. Il est par exemple limité au courant maximal accepté par la batterie en charge et en décharge [JINRUI 06]. Pour notre stratégie, la saturation du courant du banc de batteries sera variable dans le temps.

Nous avons développé une stratégie « fonction de l'accélération » qui se rapproche de celle utilisée dans les travaux effectués sur un VE mixte batteries / supercondensateurs de [GUIDI 09].

Enfin, la stratégie « fonction des résistances » ne se base sur aucuns travaux existants.

4.2.2.2. Stratégie de base « fonction des résistances »

Pour cette stratégie, en fonctionnement normal (hors modes de limitation), le coefficient de distribution k_d en sortie du bloc de stratégie (cf. Figure 4-3) est calculé de façon à minimiser les pertes globales du SSE électrique mixte (Figure 4-10).

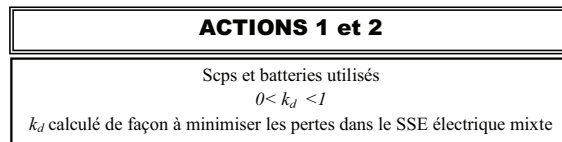


Figure 4-10. Actions 1 et 2 de la stratégie de base «fonction des résistances des SSE électriques»

Les pertes étant directement proportionnelle à Ri^2 , cette stratégie va avoir tendance à solliciter le SSE électrique ayant la plus petite résistance interne. La résistance interne d'une batterie R_{el_batt} est généralement bien plus importante que celle d'un supercondensateur R_{el_scp} . Pour notre application, pour une batterie Ni-MH, on a $R_{el_batt} = 86,8 \text{ m}\Omega$ et pour le banc batteries, en tenant compte du nombre de batteries en série et en parallèle, on a : $R_{batt} = 60,8 \text{ m}\Omega$ car le nombre de batteries mises en série est égal au nombre de batteries mises en parallèle. Pour un supercondensateur Batscap, on a $R_{el_scp} = 0,26 \text{ m}\Omega$ et pour le banc de supercondensateurs, on a : $R_{scp} = 20,8 \text{ m}\Omega$. La résistance interne équivalente du banc de batteries R_{batt} est environ 4 fois plus grande celle du banc de supercondensateurs R_{scp} . Ainsi, cette stratégie tout en minimisant les pertes globales du SSE électrique mixte, va avoir tendance à solliciter d'avantage le banc de supercondensateurs plutôt que le banc de batteries, étant donné que sa résistance interne équivalente est plus faible.

Le coefficient k_d est obtenu à partir du courant de référence i_{ref} , et du courant de référence $i_{h_batt_ref}$.

$$k_d = \frac{i_{h_batt_ref}}{i_{ref}} \tag{74}$$

Le courant de référence $i_{h_batt_ref}$ est calculé de façon à minimiser les pertes dans le SSE électrique mixte à partir d'une méthode de calcul effectuée hors ligne. Cette méthode s'effectue en plusieurs étapes.

Pour simplifier les équations, les modèles du banc de batteries et du banc de supercondensateurs utilisés sont deux modèles simples, constitués de la mise en série d'une source de tension (U_{batt_0} pour le banc de batteries et U_{scp_0} pour le banc de supercondensateurs) et d'une résistance interne (R_{batt} pour le banc de batteries et R_{scp} pour le banc de supercondensateurs).

On considère que les pertes dans le SSE électrique mixte, P_{pertes_SSE} , se réduisent aux seules pertes dans les inductances, les batteries et les supercondensateurs ; les pertes dans les hacheurs et dans le bus continu ne sont pas prises en compte :

$$P_{pertes_SSE} = (R_{batt} + r_{L1}) \left(\frac{i_{h_batt}}{m_1} \right)^2 + (R_{scp} + r_{L2}) \left(\frac{i_{h_scp}}{m_2} \right)^2 \quad (75)$$

Où r_{L1} , r_{L2} sont les résistances internes des inductances L_1 et L_2 , et m_1 et m_2 , les fonctions de modulation des hacheurs H_1 et H_2 .

Pour extraire le courant i_{h_batt} de l'expression des pertes P_{pertes_SSE} , il faut d'abord exprimer ces pertes en fonction des seuls courants i_{h_batt} et i (76), puis les dériver par rapport au courant i_{h_batt} . Pour minimiser les pertes dans le SSE électrique mixte, il suffit que cette dérivée partielle soit égale à 0, et d'en extraire le courant i_{h_batt} (77). Pour réaliser le calcul, on suppose que le courant i est constant sur le pas de calcul considéré.

$$P_{pertes_SSE} = \text{fct}(i_{h_batt}, i) \quad (76)$$

$$\left. \frac{\partial P_{pertes_SSE}(i_{h_batt}, i)}{\partial i_{h_batt}} \right|_{i=cte} = 0 \Rightarrow i_{h_batt_ref} = \frac{i(R_{scp} + R_{L2})U_{batt_0}^2}{(R_{batt} + R_{L1})U_{scp_0}^2 + (R_{scp} + R_{L2})U_{batt_0}^2} \quad (77)$$

Les détails des calculs intermédiaires pour l'obtention du courant $i_{h_batt_ref}$ sont donnés en Annexe I.

4.2.2.3. Stratégie de base « fonction de l'accélération »

La force de traction F_{tract} , nécessaire à l'avancement du véhicule, peut se décomposer en une force résistive globale F_{res} et en une force fonction de l'accélération du véhicule F_{acc} (cf. Chapitre 2, § 2.1.3.7).

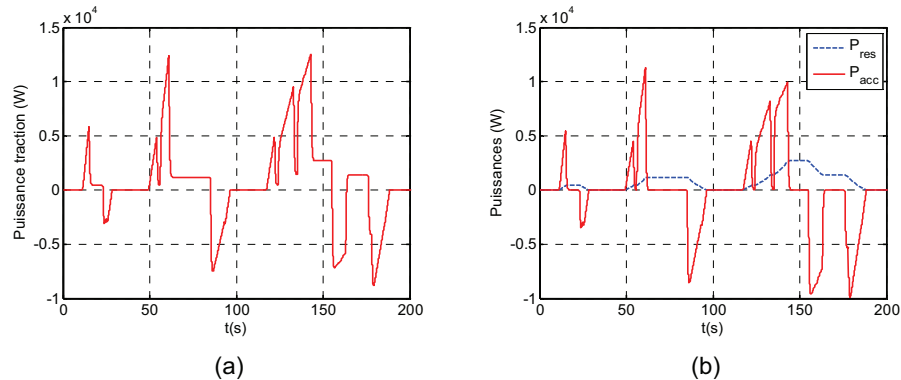
$$F_{tract} = F_{acc} + F_{res} \text{ avec } F_{acc} = M_{eq} a_{veh} \quad (78)$$

Où M_{eq} est la masse équivalente du véhicule et a_{veh} , l'accélération du véhicule.

Généralement les demandes en puissance P_{acc} pour contrer la force F_{acc} sont beaucoup plus importante que celles P_{res} pour contrer la force F_{res} (Figure 4-11.a, b) :

$$P_{tract} = P_{acc} + P_{res} \text{ avec } P_{acc} = v_{veh} M_{eq} a_{veh} \text{ et } P_{res} = v_{veh} F_{res} \quad (79)$$

Où v_{veh} est la vitesse du véhicule.



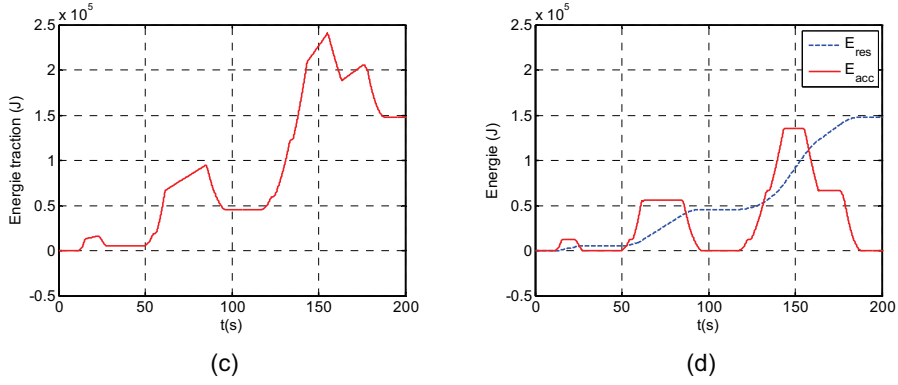


Figure 4-11. Puissances et énergies mises en jeu sur un trajet ECE

Pour cette stratégie, pendant les phases d'accélération et à vitesse constante, toujours avec l'objectif de solliciter le moins possible le banc de batteries, le banc de supercondensateurs fournit la puissance P_{acc} et le banc de batteries, la puissance P_{res} . Pendant les phases de décélération, le banc de supercondensateurs absorbe la puissance P_{acc} et le banc de batteries fournit la puissance P_{res} .

La tension du bus continu u_c étant maintenue constante, pour que le banc de supercondensateurs fournisse ou absorbe la puissance P_{acc} , il suffit qu'il fournisse ou reçoive le courant correspondant i_{acc} . De même, pour que le banc de batteries fournisse la puissance P_{res} , il suffit qu'il fournisse le courant correspondant i_{res} (Figure 4-12).

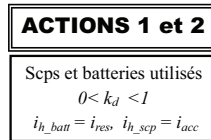


Figure 4-12. Actions 1 et 2 de la stratégie de base «fonction de l'accélération»

Le coefficient de distribution k_d est obtenu à partir du courant de référence i_{ref} , et du courant de référence $i_{h_batt_ref}$:

$$k_d = \frac{i_{h_batt_ref}}{i_{ref}} \text{ avec } i_{h_batt_ref} = i_{res} = \frac{P_{res}}{u_c} = \frac{P_{tract} - P_{acc}}{u_c} \tag{80}$$

En théorie, pour cette stratégie, les supercondensateurs fournissent autant d'énergie qu'ils en absorbent. Ainsi à la fin d'un cycle de vitesse, leur bilan énergétique est nul (cf. Figure 4-11.d) :

$$\Delta E_{acc} = E_{acc_max} - E_{acc_min} = 0 \tag{81}$$

4.2.2.4. Stratégie de base « de filtrage »

Cette stratégie utilise une approche fréquentielle : les batteries fournissent la partie basse fréquence de la puissance de traction, et les supercondensateurs la partie haute fréquence. Ainsi on tend à s'approcher de notre objectif initial qui consiste à ce que les batteries fournissent la puissance moyenne de traction et le banc de supercondensateurs, les pics de puissance.

Etant donné que la tension du bus continu u_c est maintenue constante, il suffit pour y parvenir de filtrer le courant i . Celui-ci est filtré à l'aide d'un filtre passe-bas du premier ordre : le courant filtré i_{BF} (composante basses fréquences de i) définit le courant de référence $i_{h_batt_ref}$ et le reste du courant i_{HF} (composante hautes fréquences du courant i) définit courant de référence $i_{h_scp_ref}$. De plus, lorsque le courant i_{BF} devient inférieur à 0, le courant de référence est imposé égal à 0 (Figure 4-13).

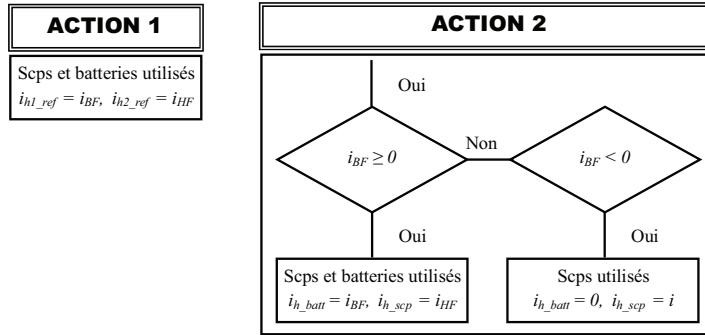


Figure 4-13. Actions 1 et 2 de la stratégie de base «de filtrage»

4.2.2.5. Stratégie de base « avec saturation du courant »

L'idée de cette stratégie consiste à limiter la puissance fournie ou reçue par le banc de batteries. Etant donné que la tension du bus continu u_c est maintenue constante, il suffit pour y parvenir de limiter le courant i_{h_batt} (Figure 4-14).

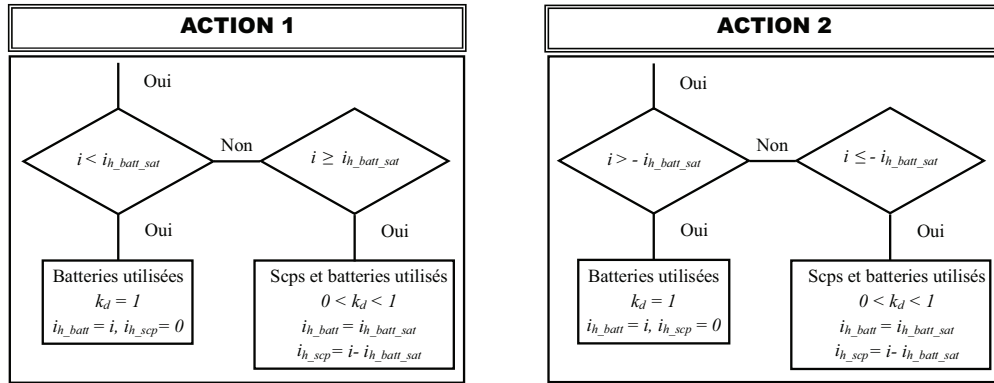


Figure 4-14. Principe de la stratégie de base « avec saturation du courant »

Lorsque le courant $i > 0$, le courant i_{h_batt} est limité au courant $+i_{h_batt_sat}$. Lorsque le courant $i < 0$, le courant i_{h_batt} est limité au courant $-i_{h_batt_sat}$. Ainsi, les batteries fournissent et reçoivent le courant i tant que celui-ci est inférieur au courant de saturation $i_{h_batt_sat}$ et supérieur au courant $-i_{h_batt_sat}$. Le courant de saturation $i_{h_batt_sat}$ correspond à la valeur moyenne du courant de traction, calculé sur une fenêtre glissante (Figure 4-14). En effet, étant donné que le trajet n'est pas connu par avance, le calcul du courant de traction moyen est effectué sur une partie passée du courant de traction, définie dans le temps par la largeur de la fenêtre glissante choisie (Figure 4-15). Le courant de saturation $i_{h_batt_sat}$ appliqué au cours de la fenêtre n résulte du calcul du courant de traction moyen effectué à la fenêtre $n-1$.

Le coefficient de distribution k_d est obtenu à partir du courant de référence i_{ref} , et du courant de référence $i_{h_batt_ref}$.

$$k_d = \frac{i_{h_batt_ref}}{i_{ref}} \text{ avec } i_{h_batt_ref} = i_{ref} \text{ tant que } -i_{h_batt_sat} < i_{ref} < i_{h_batt_sat} \quad (82)$$

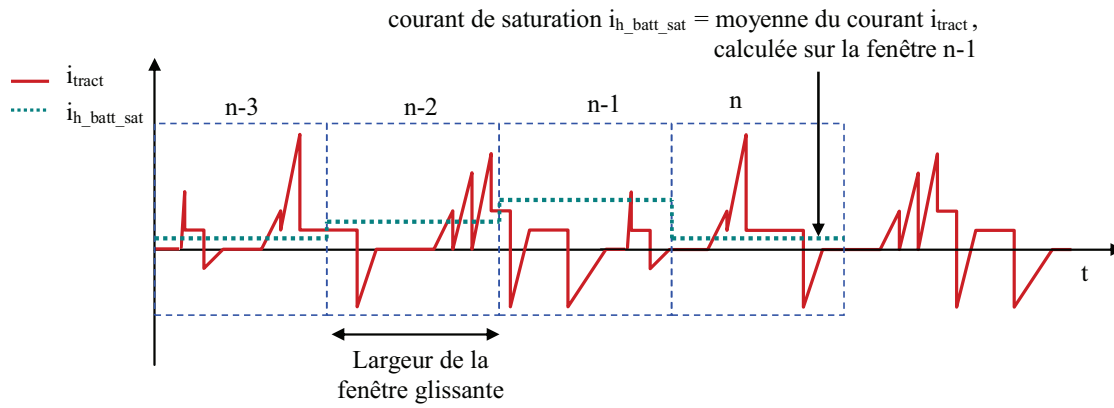


Figure 4-15. Calcul du courant moyen de traction

4.2.3. Comparaison

Le VE mixte est comparé au VE utilisant uniquement des batteries, pour chaque stratégie, sur l'ensemble des critères définis précédemment.

4.2.3.1. Résultats de simulation

Le système étudié est simulé sous Matlab-Simulink sur 4 cycles normalisés urbains ECE (Figure 4-16). Les caractéristiques du système de traction des deux véhicules sont celles du système de traction de la voiture électrique mixte données au chapitre 2 (cf. § 2.1.4.1). Les résultats de simulation du VE avec batteries sont donnés Figure 4-17 et ceux du VE mixte avec batteries et supercondensateurs, pour différentes stratégies de gestion de l'énergie, Figure 4-18. Pour le VE mixte, en appliquant la stratégie «fonction des résistances internes », la puissance de traction est répartie entre le banc de batteries et le banc de supercondensateurs de manière à ce que les pertes dans le SSE électrique mixte soient minimisées. Cette stratégie a tendance à solliciter le banc de supercondensateurs plutôt que le banc de batteries. En fonctionnement normal ($U_{scp_min} < u_{scp} < U_{scp_max}$), le courant du banc batteries est environ 2,5 fois plus faible que celui fourni et reçu par le banc de supercondensateurs (Figure 4-18.A.a). Etant donné que cette stratégie privilégie l'utilisation du banc de supercondensateurs, à la fin du troisième cycle de vitesse, celui-ci atteint sa tension de limitation basse ($u_{scp} = U_{scp_min}$) et on passe en mode de limitation (Figure 4-18.A.b). A ce moment là, le banc de batteries assure, à lui seul, la traction du véhicule jusqu'à la prochaine décélération, où l'énergie renvoyée par le véhicule va permettre de recharger en partie le banc de supercondensateurs.

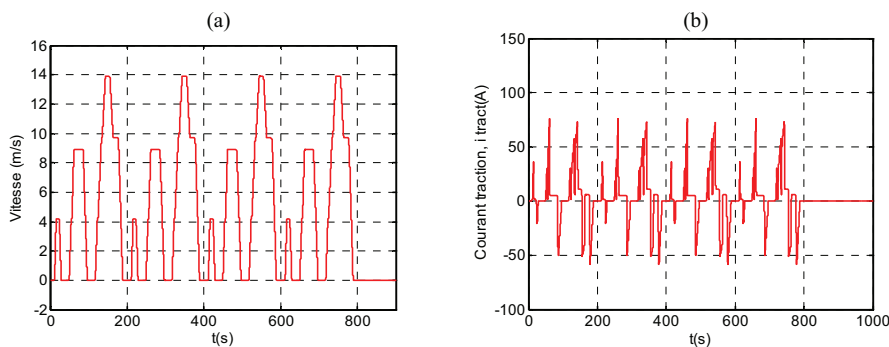


Figure 4-16. Vitesse et courant de traction sur 4 cycles ECE

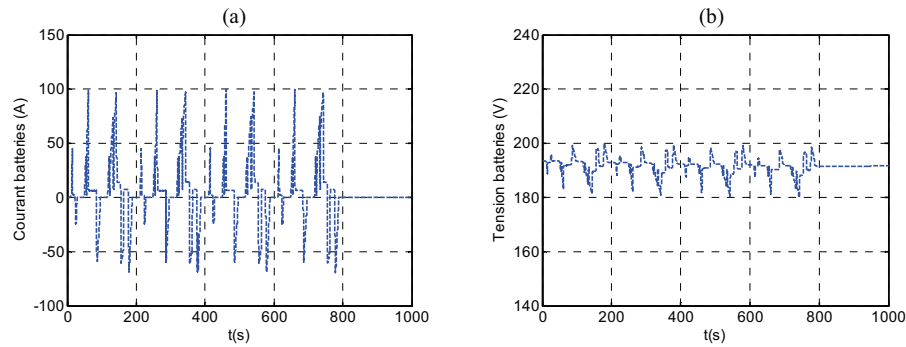


Figure 4-17. Résultats de simulation pour la voiture électrique avec batteries seules

En fin de parcours, lorsque le véhicule est à l'arrêt, le banc de supercondensateurs est entièrement rechargé, à courant constant, par le banc de batteries (jusqu'à $u_{scp} = U_{scp_max}$). Cette recharge s'effectue sous un courant de $2C$ (c'est-à-dire $2C_{batt}h^{-1}$).

Pour la stratégie « fonction de l'accélération », le banc de supercondensateurs fournit et reçoit la partie de la puissance de traction proportionnelle à l'accélération du véhicule, et le banc de batteries fournit et reçoit le reste (Figure 4-18.B.a). Cette stratégie sollicite autant les supercondensateurs à fournir qu'à recevoir de la puissance. Aussi en fin de parcours, les supercondensateurs sont quasiment entièrement rechargés (Figure 4-18.B.b). Pendant les phases de décélération, la puissance renvoyée par le véhicule est entièrement absorbée par le banc de supercondensateurs. Nous avons supposé dans cette étude préliminaire que l'accélération était mesurable, nous verrons cependant qu'en pratique, l'estimation difficile de l'accélération a tendance à dégrader cette stratégie.

Pour la stratégie « de filtrage », le banc de supercondensateurs fournit la partie hautes fréquences de la puissance de traction et le banc de batteries, la partie basses fréquences. Il en résulte que le courant du banc de batteries est lissé tandis que celui du banc de supercondensateurs présente d'importants pics (Figure 4-18.C.a). Le filtrage introduit un déphasage du courant du banc batteries par rapport au courant de traction. Ainsi, pendant les phases de décélération, ce déphasage peut amener le banc de batteries à recharger le banc de supercondensateurs. Pour le cas étudié, on constate que cette recharge n'est pas nécessaire car le banc de supercondensateurs atteint sa tension maximale ($u_{scp} = U_{scp_max}$), et on passe en mode de limitation (Figure 4-18.C.a). A ce moment là, le banc de batteries absorbe à lui seul la puissance renvoyée par le véhicule jusqu'à la prochaine accélération, où le banc de supercondensateurs va être à nouveau sollicité et va se décharger.

Comme pour la stratégie « fonction de l'accélération », en fin de parcours, le banc de supercondensateurs nécessite une très faible recharge car il est quasiment entièrement rechargé (Figure 4-18.C.b). La fréquence du filtre passe-bas, qui est du premier ordre, a été fixée à 6 mHz. L'influence de la fréquence de coupure du filtre sera étudiée dans la deuxième partie du chapitre.

Pour la stratégie « avec saturation du courant », le courant du banc batteries est saturé aussi bien quand celui-ci fournit de la puissance que quand celui-ci en reçoit (Figure 4-18.D.a). La valeur du courant de saturation $i_{h_batt_sat}$ est obtenue à partir du courant de traction moyen, calculé sur une fenêtre de temps glissante (Figure 4-18.D.a, avec $i_{batt_sat} = i_{h_batt_sat} / m_I$). Pour le cas étudié, la largeur de la fenêtre glissante a été choisie égale à 100 s. Pendant les 100 premières secondes du trajet, on a choisi d'imposer le courant de saturation $i_{h_batt_sat}$, égal au courant de traction moyen sur un cycle ECE. Cette stratégie a tendance à fortement solliciter le banc de supercondensateurs, aussi comme pour la « stratégie fonction des résistances », on passe rapidement en mode de limitation ($u_{scp} = U_{scp_min}$), et en fin de parcours, le banc de supercondensateurs nécessite d'être recharger (Figure 4-18.D.a). L'influence

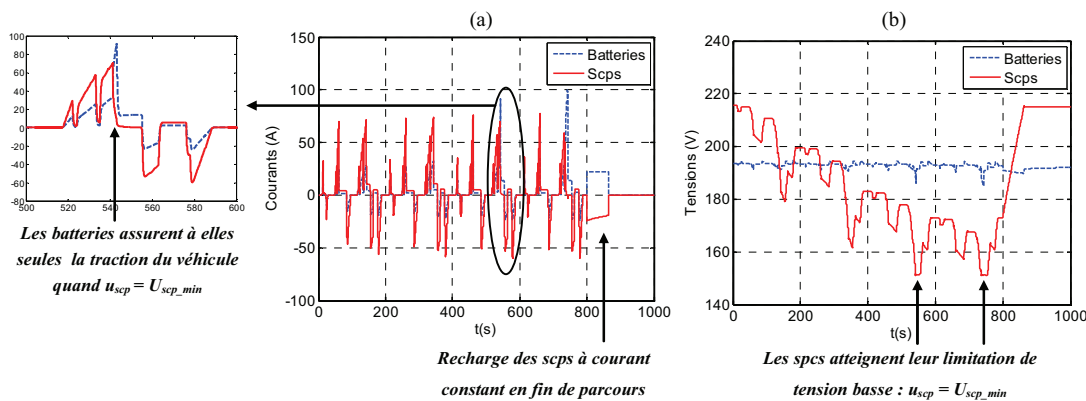
de la largeur de la fenêtre glissante pour le calcul du courant de saturation $i_{h_batt_sat}$ sera étudiée dans la deuxième partie du chapitre.

4.2.3.2. Comparaison générale des deux véhicules et conclusions

Le VE mixte est comparée, pour chaque stratégie de gestion de l'énergie présentée précédemment, à un VE utilisant uniquement des batteries. Cette comparaison est effectuée sur l'ensemble des critères définis précédemment (cf. § 4.2.4). Nous nous intéresserons en plus, aux pertes dans le SSE électrique mixte.

Cette première comparaison est une comparaison générale des deux véhicules. Les stratégies de gestion de l'énergie pour le VE mixte seront comparées entre elles au paragraphe suivant.

Le critère de consommation électrique de la batterie est la charge électrique consommée sur le trajet considérée ΔQ_{batt_consom} . Pour le VE mixte, cette consommation est légèrement réduite, sur l'ensemble des stratégies mises en place, par rapport à celle d'un VE avec batterie seules ($\Delta Q_{batt_consom_VE} > \Delta Q_{batt_consom_VE_mixte}$) (Figure 4-19.a). En effet, les pertes dans le SSE électrique mixte sont moins importantes bien qu'on ait rajouté des éléments supplémentaires (cf. Figure 4-19.b). Les pertes dans les stockeurs sont directement proportionnelles à leur résistance interne équivalente (Ri^2). Généralement, la résistance interne d'une batterie est beaucoup plus importante que celle d'un supercondensateur. Ainsi, pour un même courant et pour le système étudié, les pertes sont moins importantes dans un supercondensateur que dans une batterie. C'est aussi le cas dans notre système avec le banc batteries et le banc de supercondensateurs choisis (cf. 4.3.1). Ainsi, pour le VE mixte, pendant les phases où le banc de supercondensateurs est utilisé seul ou avec le banc de batteries, les pertes sont moins importantes que si celles-ci avaient été utilisées seules. Il faut cependant noter que ces pertes sont dépendantes de la technologie de batteries utilisées (la résistance interne équivalente varie d'une technologie à l'autre) ainsi que des inductances et des supercondensateurs choisis. Globalement, sur le trajet considéré, on peut dire que l'ajout de supercondensateurs dans un VE avec batteries permet de réduire légèrement la consommation électrique de celles-ci.



(A) Stratégie « fonction des résistances »

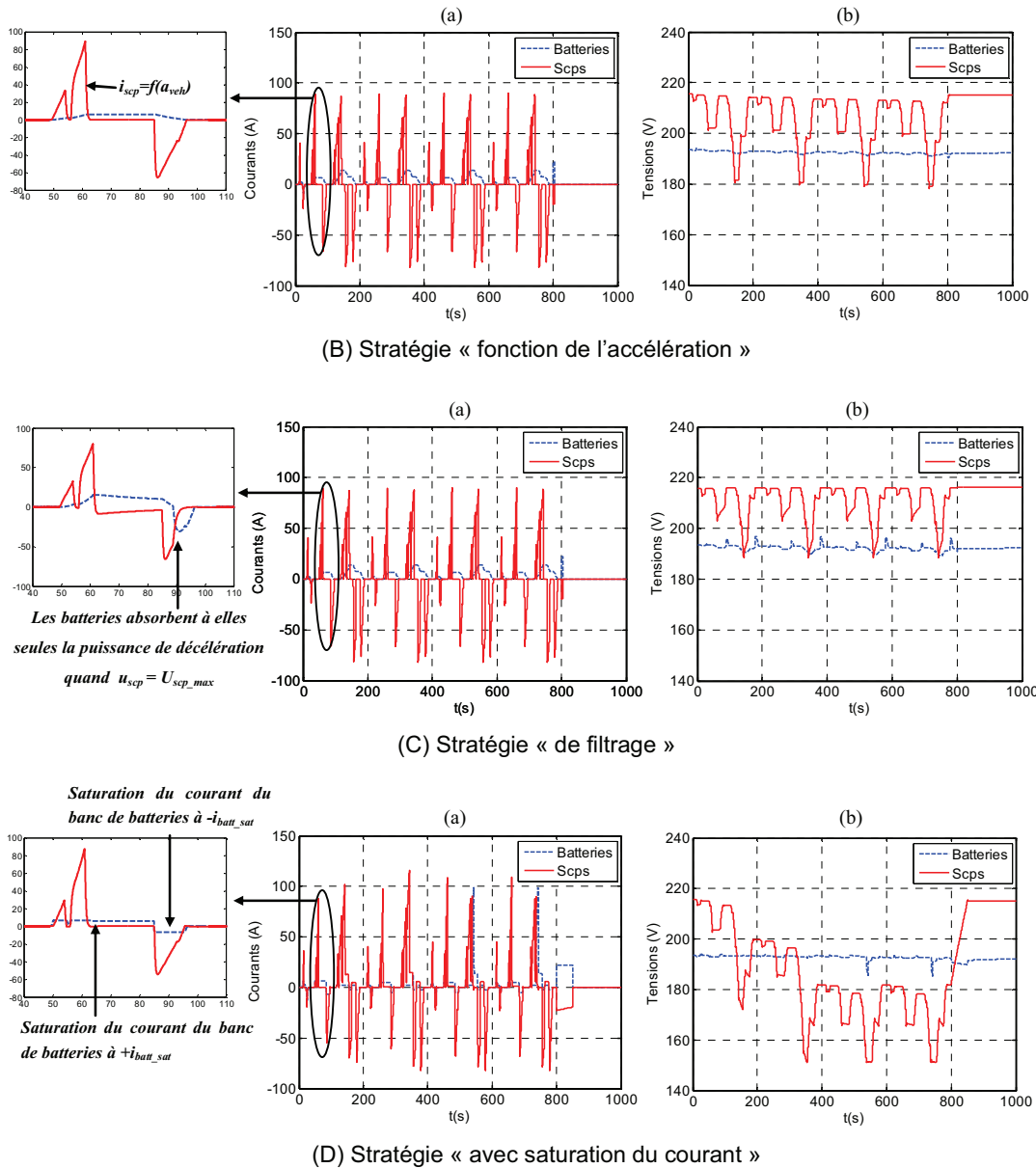


Figure 4-18. Résultats de simulation pour la voiture électrique mixte

Les critères de durée de vie de la batterie étudiés sont : la différence d'état de charge de la batterie $\Delta SOC_{batt_balayé}$ entre l'état de charge maximal SOC_{batt_max} et l'état de charge minimal SOC_{batt_min} , le courant efficace du banc batteries i_{eff_batt} , et la distribution de courant du banc de batteries. La gamme de SOC balayée par le banc batteries pour le VE mixte est inférieure à celle du VE avec batterie seules : $\Delta SOC_{batt_balayé_VE} > \Delta SOC_{batt_balayé_VE_mixte}$ (Figure 4-19.c). L'élévation en température des batteries est également moins importante pour VE mixte: $I_{el_eff_batt_VE} \gg I_{el_eff_batt_VE_mixte}$ (Figure 4-19.d), et la distribution du courant du banc de batteries montre que ce véhicule sollicite moins les batteries dans les classes de courant supérieures à 25A et inférieures à -25 A (Figure 4-20). Pour le trajet considéré, la distribution du courant du banc batteries est répartie sur 7 classes de courant. Chaque classe de courant couvre une gamme de courant de 25 A. La première classe de courant couvre les courants compris entre -75A et 50A, la deuxième classe entre -50A et 25A, ainsi de suite jusqu'à 100A. Pour chaque classe de courant, la charge consommée ou absorbée est comptabilisée en Ah sur l'ensemble du trajet considéré. Globalement, sur le trajet considéré et à la vue des résultats, on peut estimer que

l'ajout de supercondensateurs dans un VE avec batteries permettrait d'augmenter la durée de vie des celles-ci.

Les critères de dimensionnement de la batterie sont : les énergies à stocker dans le banc batteries pour un dimensionnement en énergie et en puissance (en charge et en décharge). Il apparaît que pour un dimensionnement en énergie ou un dimensionnement en puissance basée sur la charge, l'énergie à stocker est moins importante pour le VE mixte sur l'ensemble des stratégies, que pour le VE avec batterie seules (Figure 4-19.e, f). Pour un dimensionnement en puissance basé sur la décharge, l'énergie à stocker dans les batteries est également moins importante, notamment pour les stratégies « fonction de l'accélération » et « de filtrage » (Figure 4-19.g).

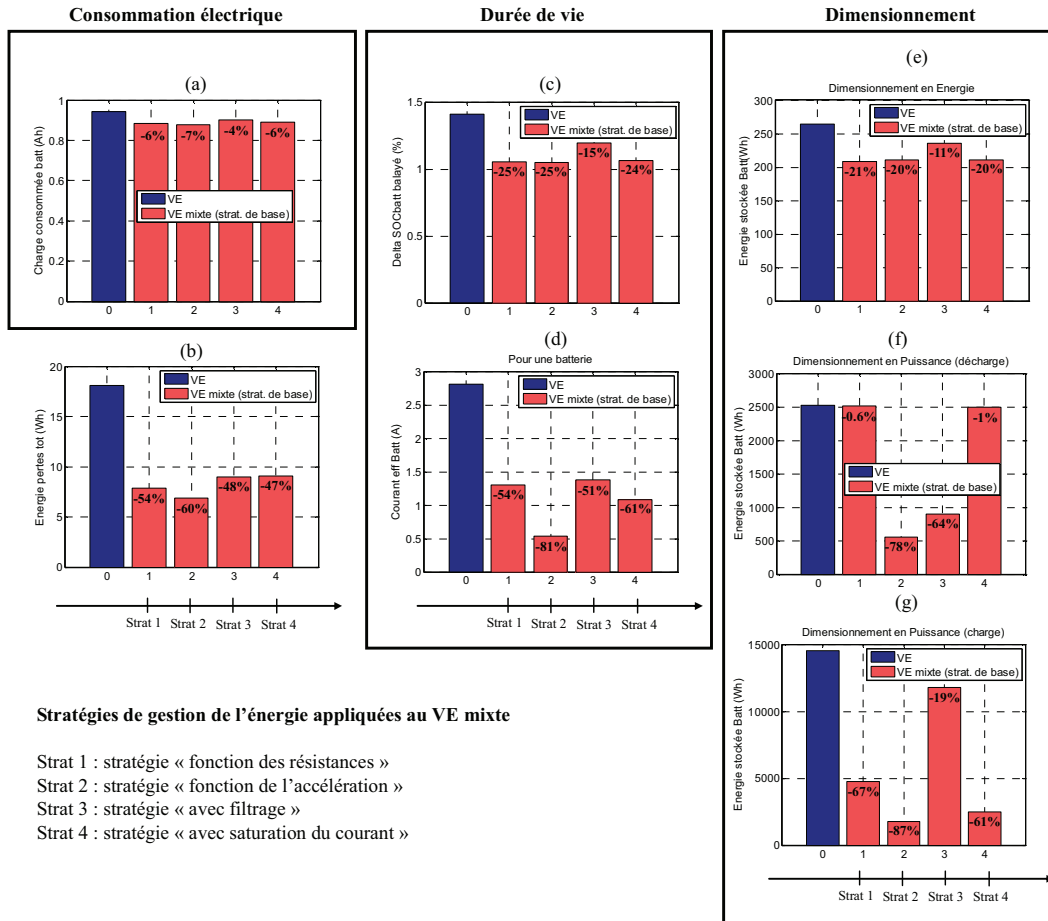
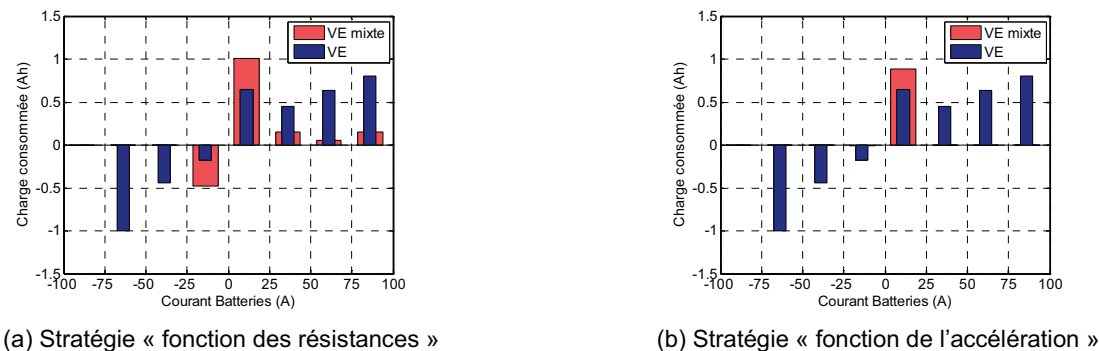
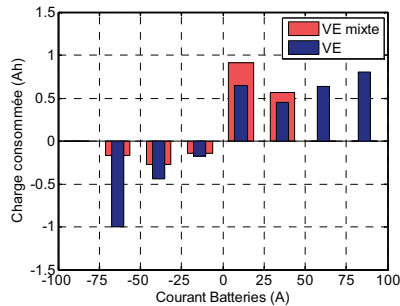
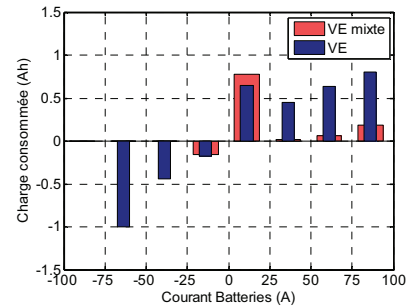


Figure 4-19. Comparaison des deux véhicules en utilisant différentes stratégies pour le VE mixte





(c) Stratégie « de filtrage »



(d) Stratégie « avec saturation du courant »

Figure 4-20. Distribution du courant du banc batteries pour les deux véhicules

4.2.3.3. Comparaison des stratégies pour le VE mixte

Nous proposons de comparer les différentes stratégies de gestion de l'énergie sur 4 indices de performances, à l'aide de diagrammes araignées, suivant les 8 critères exposés précédemment (Figure 4-21). La répartition des indices de performances suivant les critères de comparaison est basée sur la position des stratégies les unes par rapport aux autres (Tableau 4-2).

Ainsi par exemple, pour le critère du courant efficace du banc de batteries, plus l'indice de performance augmente, plus la stratégie considérée, est intéressante pour ce critère, par rapport à l'ensemble des stratégies étudiées.

Parmi les stratégies utilisées, la stratégie « avec filtrage » avec la fréquence de coupure choisie semble la moins intéressante et se place souvent en 3^{ème} et 4^{ème} position par rapport aux autres stratégies (cf. Figure 4-21.c). En effet, c'est la stratégie qui utilise le plus les batteries : consommation électrique, courant efficace et dimensionnement en énergie les plus importants (cf. Figure 4-19.a, c, d). De plus, cette stratégie a tendance à trop recharger les supercondensateurs par les batteries. Ainsi lorsque le banc de supercondensateurs atteint sa tension de limitation haute ($u_{scp} = U_{scp_max}$), on passe alors en mode de limitation. A ce moment là, les batteries doivent absorber la puissance renvoyée par le véhicule (Figure 4-19.g, Figure 4-20.c).

Les stratégies « fonction des résistances internes » et « avec saturation du courant », sont les moins intéressantes pour un dimensionnement en puissance basé sur la décharge où elles se positionnent respectivement et 4^{ème} et 3^{ème} position (cf. Figure 4-21.a, d). En effet, elles ont tendance à trop décharger les supercondensateurs. Ainsi, lorsque le banc de supercondensateur atteint sa tension de limitation basse ($u_{scp} = U_{scp_min}$), on passe alors en mode de limitation. A ce moment là, les batteries sont amenées à fournir des courants aussi élevés que ceux fournis par le VE avec batterie seules (cf. Figure 4-20.a et d, distribution de courant dans les classes de courants supérieures à 25A).

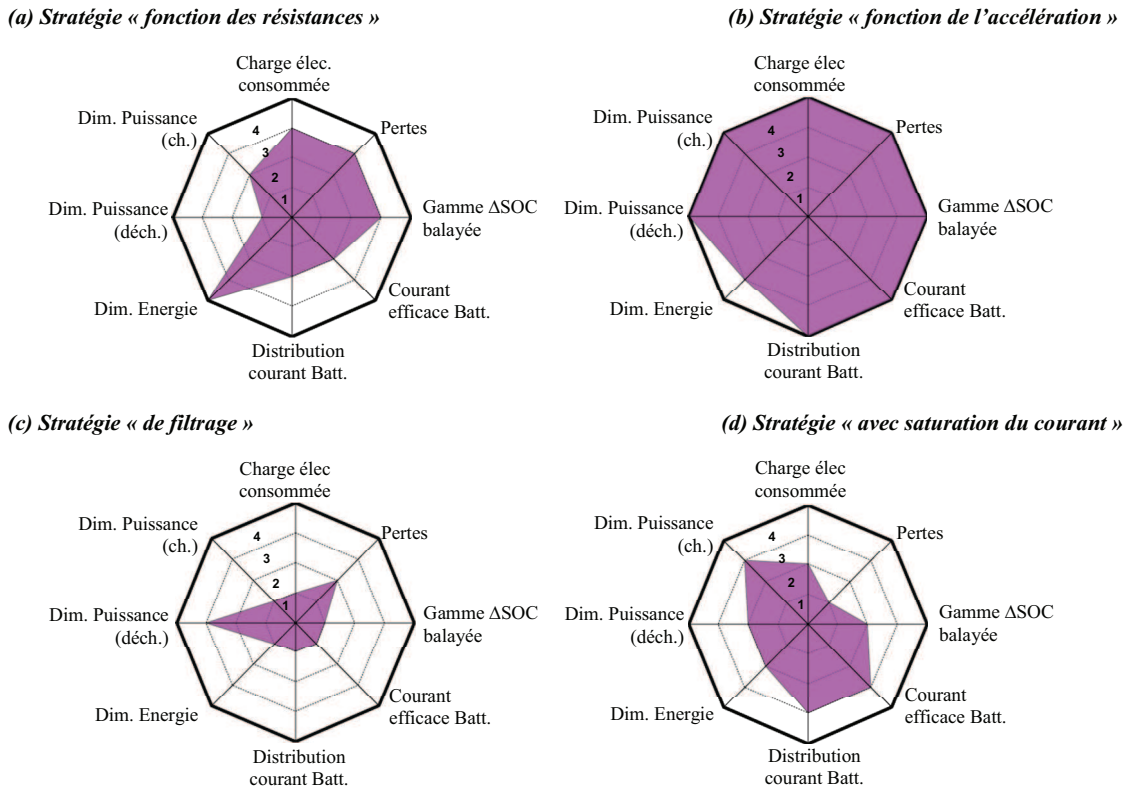


Figure 4-21. Comparaison des stratégies de base du VE mixte

Tableau 4-2 Répartition des 4 indices de performance

Indice 1 → Stratégie positionnée en 4 ^{ème} position
Indice 2 → Stratégie positionnée en 3 ^{ème} position
Indice 3 → Stratégie positionnée en 2 ^{ème} position
Indice 4 → Stratégie positionnée en 1 ^{ère} position

La stratégie « fonction de l'accélération » semble être la stratégie la mieux adaptée pour un SSE électrique mixte et se place soit en 1^{ère} soit en 2^{ème} position (cf. Figure 4-21.b). C'est la stratégie qui permet d'avoir le dimensionnement en puissance (en charge ou en décharge) le plus faible car elle sollicite les batteries qu'à faible courant sur la classe de courant comprise entre 0A et 25A (cf. Figure 4-20.b). C'est la seule stratégie qui n'entre pas en mode de limitation pour ce cycle bien particulier.

4.3. Stratégies plus évoluées

L'analyse des résultats obtenus pour le VE mixte pour les différentes stratégies de gestion de l'énergie de base va nous permettre de mettre en place des stratégies de gestion de l'énergie plus évoluées qui répondent mieux aux contraintes d'un stockage mixte par batteries et supercondensateurs. Comme dans la partie précédente, le VE mixte sera ensuite comparé pour chaque stratégie au VE utilisant uniquement des batteries.

4.3.1. Approche

A partir de l'analyse des résultats obtenus pour le VE mixte pour les différentes stratégies de base, il est souhaitable que le banc de supercondensateurs n'atteigne pas sa tension minimale pendant les phases d'accélération et à vitesse constante. De même, il est souhaitable qu'il n'atteigne pas non

plus sa tension maximale pendant les phases de décélération. En effet, dans un cas comme dans l'autre, le banc de supercondensateurs ne peut plus être utilisé, et on perd, à ce moment là, les bénéfices de l'association batteries / supercondensateurs.

Deux approches sont alors possibles pour éviter ces deux situations. La première approche consiste à redimensionner le banc de supercondensateurs, la deuxième consiste à essayer d'améliorer les stratégies de gestion de l'énergie. Il nous a semblé plus judicieux de choisir la seconde approche. En effet, pour la stratégie « fonction des résistances » par exemple, si on choisi d'augmenter le banc de supercondensateurs, la tension à ses bornes finira quand même par atteindre sa tension minimale puisque la stratégie par son fonctionnement propre a tendance à plus décharger le banc de supercondensateurs qu'elle ne le recharge.

Nous allons supposer que le trajet considéré est un trajet plat. Pour ce type de trajet, l'énergie à fournir est toujours supérieure à l'énergie reçue. De plus, si la stratégie a tendance à décharger le banc de supercondensateurs plutôt qu'à le recharger, celui-ci aura plutôt tendance à atteindre sa tension minimale que sa tension maximale.

La première idée pour éviter de se retrouver dans cette situation consiste à ce que le banc batteries recharge le banc de supercondensateurs dès que le véhicule est à l'arrêt (Figure 4-22). Cette idée n'est intéressante que pour un trajet effectué en zone urbaine, où les arrêts sont fréquents. Si le véhicule reste à l'arrêt suffisamment longtemps, les supercondensateurs sont rechargés jusqu'à une tension cible. Cette tension cible a été choisie égale à la tension maximale du banc de supercondensateurs U_{scp_max} . En effet, nous supposons que la phase où le véhicule est à l'arrêt est suivie d'une phase d'accélération, et qu'à ce moment là, les supercondensateurs vont à nouveau être utilisés et vont se décharger.

La deuxième idée consiste à favoriser la recharge des supercondensateurs directement dans les stratégies de gestion de l'énergie, par exemple en choisissant de renvoyer la totalité de l'énergie de décélération sur le banc de supercondensateurs.

Le diagramme de la Figure 4-22 va être utilisé pour chaque stratégie de gestion de l'énergie et les actions 1 et 2 seront définies pour chacune d'entre elles.

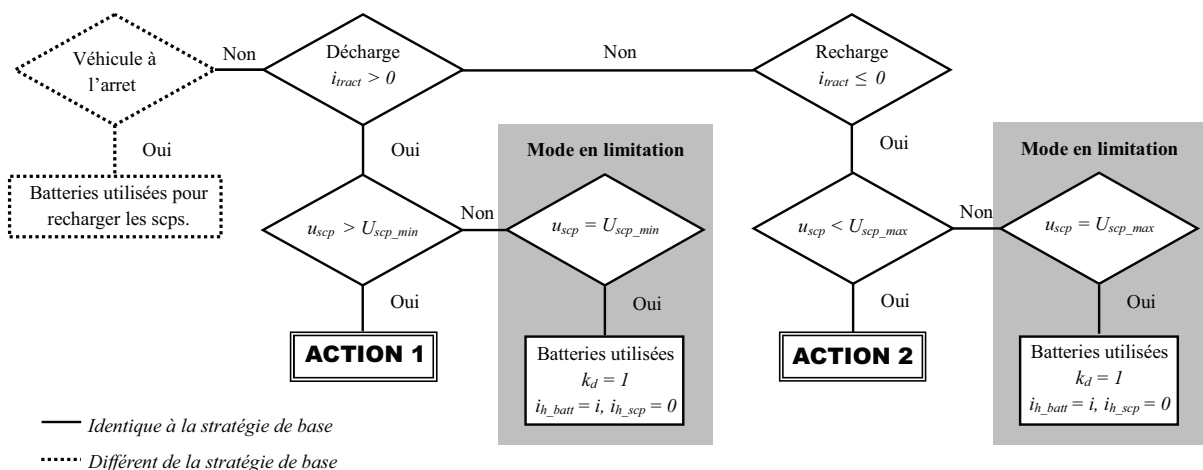


Figure 4-22. Principe des stratégies de gestion de l'énergie

4.3.2. Mise en place de stratégies plus évoluées

Les 4 stratégies de gestion de l'énergie de base présentées dans la partie précédente vont être reprises et améliorées de façon à répondre au mieux aux contraintes d'un stockage mixte par batteries et supercondensateurs.

4.3.2.1. Recharge à l'arrêt

Pour l'ensemble des stratégies développées par la suite, le banc de supercondensateurs est rechargé par le banc de batteries dès que le véhicule est à l'arrêt. Cette recharge est effectuée à courant constant avec annulation progressive du courant en fin de recharge [LHOMME 09].

Nous nous sommes fixés comme objectif de recharger le banc de supercondensateurs en 10 s, temps d'arrêt estimé d'un véhicule en zone urbaine, que nous avons estimé à partir de cycles normalisés et d'usage réel. Le courant de recharge de référence I_{batt_rech} est donc calculé à partir de la différence entre la tension du banc de supercondensateurs cible et sa tension mesurée lorsque le véhicule est à l'arrêt, Δu_{scp} , et le temps de recharge à l'arrêt Δt_{rech} :

$$I_{batt_rech} = \frac{\Delta u_{scp}}{\Delta t_{rech}} C_{scp} \text{ avec } \Delta u_{scp} = U_{scp_cible} - u_{scp} \text{ et } U_{scp_cible} = U_{scp_max} \quad (83)$$

Pour notre étude, nous avons choisi une tension cible U_{scp_cible} , égale à la tension maximale du banc de supercondensateurs U_{scp_max} (cf. § 4.3.1). De plus, pour éviter de trop solliciter les batteries, nous avons limité le courant de recharge des supercondensateurs à 5,5 C.

4.3.2.2. Stratégie évoluée « fonction des résistances des SSE électriques »

A la différence de la stratégie de base, développée au §4.2.2, pendant les phases de décélération, la puissance renvoyée par le véhicule est entièrement absorbée par le banc de supercondensateurs, dans le but de le recharger, et d'éviter que sa tension n'atteigne sa tension minimale (Figure 4-23).

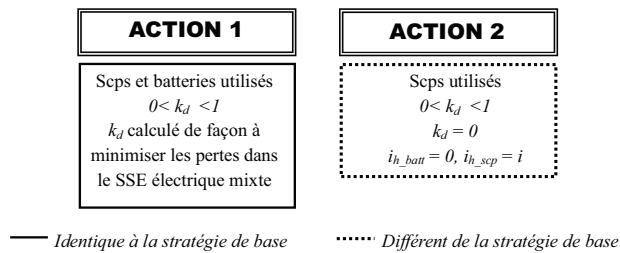


Figure 4-23. Actions 1 et 2 de la stratégie évoluée « fonction des résistances »

4.3.2.3. Stratégie évoluée «fonction de l'accélération »

Etant donné que la stratégie de base « fonction de l'accélération » développée au §4.2.2 a tendance à recharger le banc de supercondensateurs autant qu'elle le décharge, cette stratégie a été reprise à l'identique en y insérant la recharge possible du banc de supercondensateurs à l'arrêt. L'accélération est cette fois-ci estimée à partir de la vitesse. Une première approche pour estimer l'accélération consiste à dériver la vitesse, mais cette méthode présente l'inconvénient d'introduire l'opérateur non causal de dérivation (Figure 4-24.a). Une deuxième approche consiste à asservir la vitesse [VERHILLE 07]. Cette estimation de l'accélération est représentée sous la forme GIC (Groupe Informationnel Causal) à la Figure 4-24.b, formalisme développé au L2EP, qui utilise également exclusivement la causalité intégrale [HAUTIER 96]. Elle utilise les relations suivantes :

$$R_I : v_{veh_cons}(t) = \int a_{veh_cons}(t) dt \quad (84)$$

$$R_{cI} : a_{veh_cons} = C_{orr_a}(v_{veh_mes} - v_{veh_cons}) \quad (85)$$

Où C_{orr_a} est un correcteur.



(a) A partir de la dérivation de la vitesse

(b) A partir de l'asservissement de la vitesse

Figure 4-24. Estimation de l'accélération

4.3.2.4. Stratégie évoluée « de filtrage »

A la différence de la stratégie de base, développée au §4.2.2, pendant les phases de décélération, le courant du banc de batteries est imposé égal à 0, afin d'éviter que les batteries ne participent à la recharge du banc de supercondensateurs ; la puissance renvoyée par le véhicule est entièrement absorbée par les supercondensateurs (Figure 4-25).

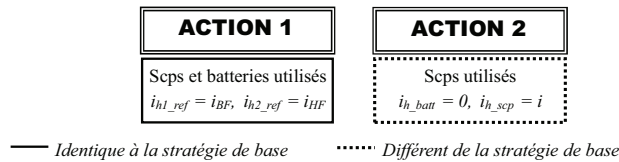


Figure 4-25. Principe de la stratégie évoluée « de filtrage »

4.3.2.5. Stratégie évoluée « avec saturation du courant »

A la différence de la stratégie de base, développée au §4.2.2, pendant les phases d'accélération et à vitesse constante ou pendant les phases de décélération, le banc de batteries fournit la valeur absolue du courant de traction $|i_{tract}|$ tant que celui-ci est inférieur au courant de saturation $i_{h_batt_sat}$ (Figure 4-26).

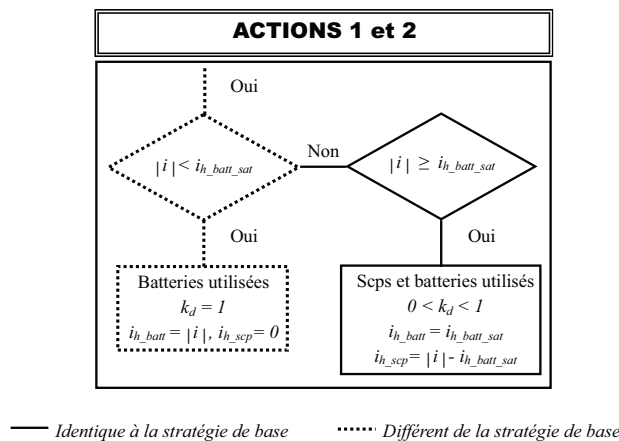


Figure 4-26. Principe de la stratégie évoluée « avec saturation du courant »

4.3.3. Comparaison

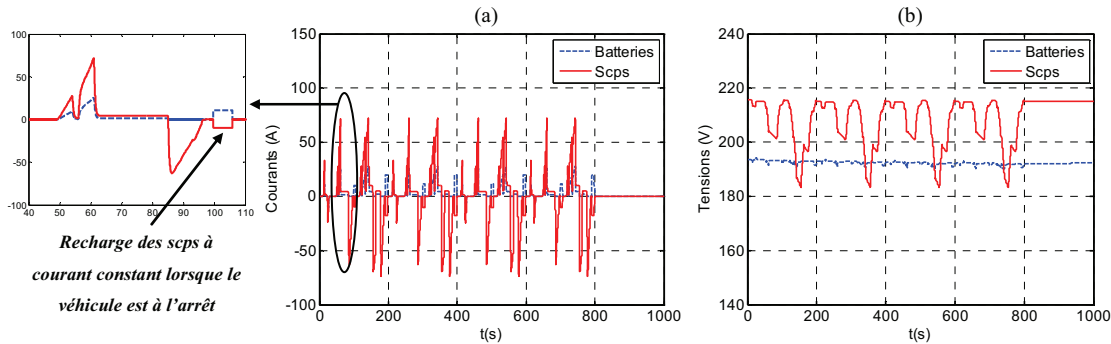
Le VE mixte est comparé au VE utilisant uniquement des batteries, pour chaque stratégie, sur l'ensemble des critères définis précédemment.

4.3.3.1. Résultats de simulation

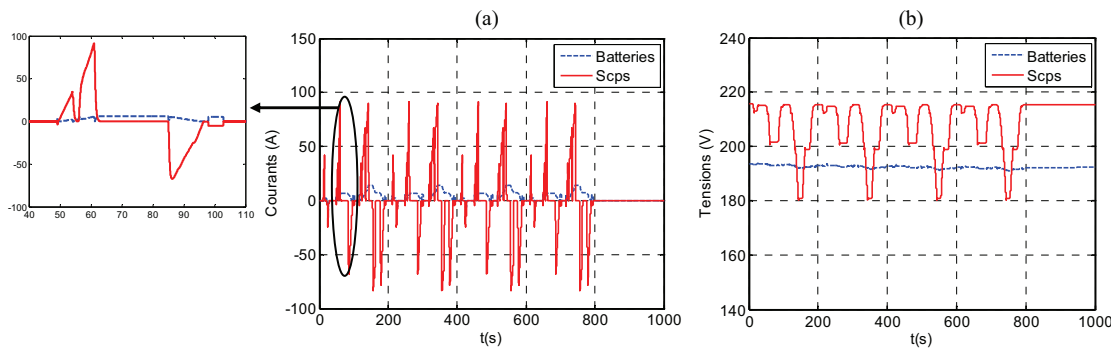
Comme précédemment, le système étudié est simulé sous Matlab-Simulink sur 4 cycles normalisés urbains ECE (Figure 4-16). Les résultats de simulation du VE avec batteries sont identiques à ceux de la Figure 4-17, ceux du VE mixte avec batteries et supercondensateurs sont donnés Figure 4-27, Figure 4-28 et Figure 4-29. Pour l'ensemble des stratégies évoluées, le banc de supercondensateurs n'atteint plus sa tension minimale, ce qui évite de passer en mode de limitation et de trop solliciter les batteries (Figure 4-27). La recharge des supercondensateurs à l'arrêt est notamment utilisée pour les stratégies « fonction des résistances » et la stratégie « avec saturation du courant » (Figure 4-27.A.a, D.a). Pour la stratégie « fonction de l'accélération », l'estimation de l'accélération est correctement effectuée (Figure 4-28). Le retard induit par l'estimation n'est pas gênant sur le trajet considéré et ne dégradent pas les performances sur les critères considérés.

4.3.3.2. Comparaison des stratégies de base et des stratégies évoluées

La distribution de courant du VE et du VE mixte pour les différentes stratégies de gestion de l'énergie, ainsi que le positionnement des stratégies les unes par rapport aux autres sont donnés en Annexe J.



(A) Stratégie « fonction des résistances »



(B) Stratégie « fonction de l'accélération »

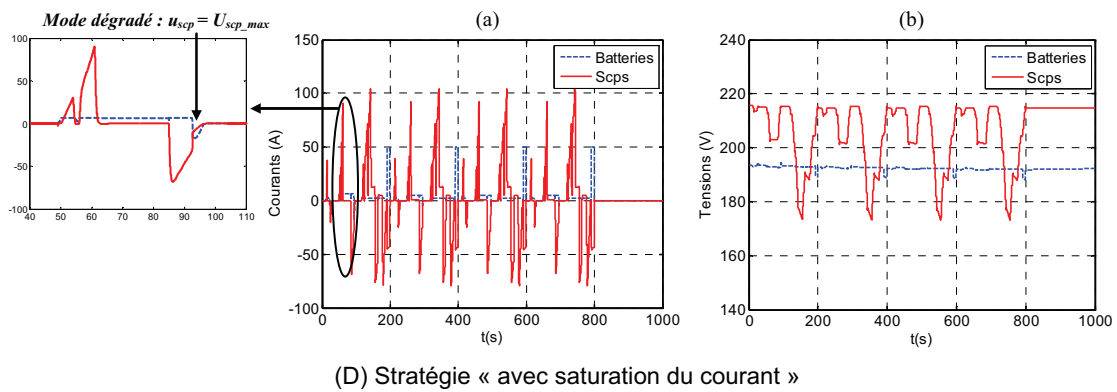
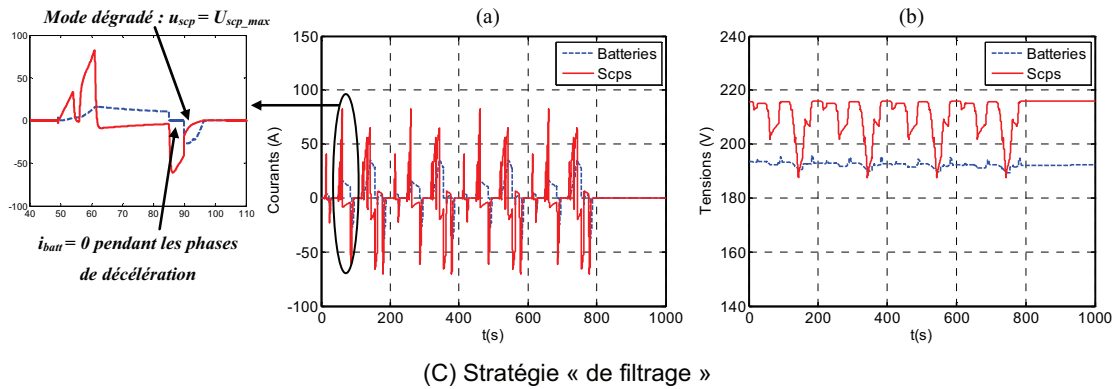


Figure 4-27. Résultats de simulation pour la voiture électrique mixte

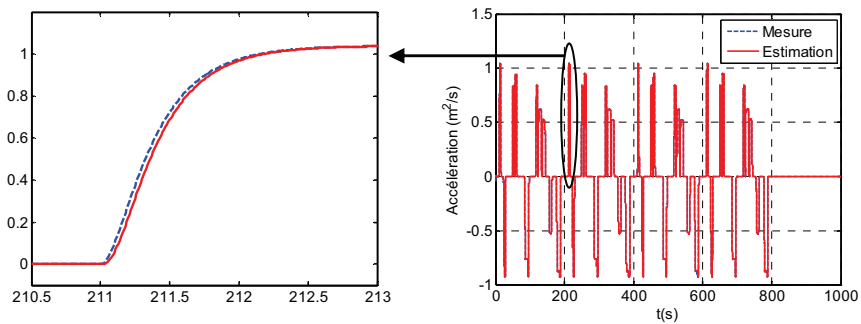
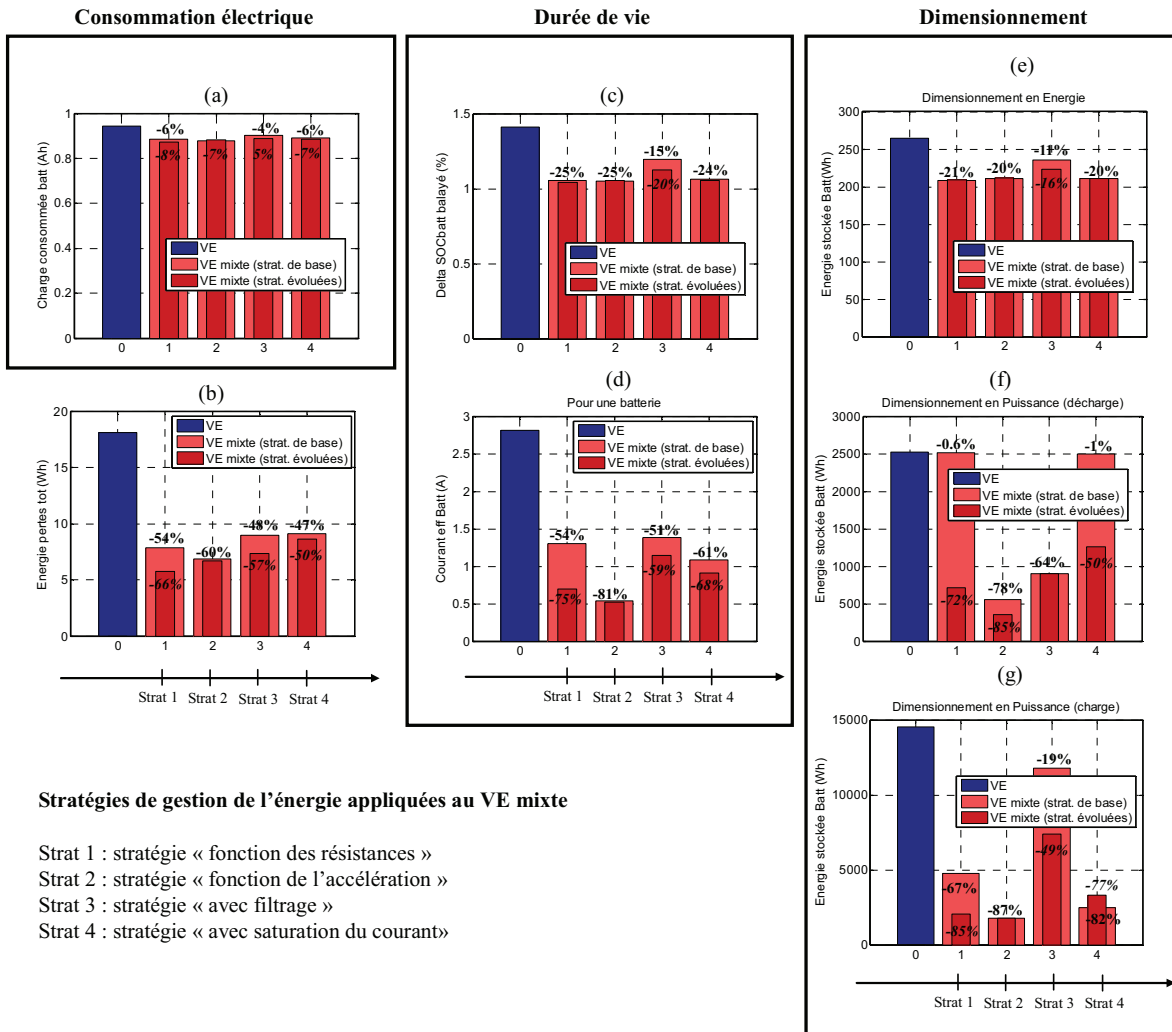


Figure 4-28. Résultats de simulation de l'estimation de l'accélération



Stratégies de gestion de l'énergie appliquées au VE mixte

- Strat 1 : stratégie « fonction des résistances »
- Strat 2 : stratégie « fonction de l'accélération »
- Strat 3 : stratégie « avec filtrage »
- Strat 4 : stratégie « avec saturation du courant »

Figure 4-29. Comparaison des deux véhicules en utilisant différentes stratégies évoluées pour le VE mixte

Pour la stratégie «avec filtrage», étant donné que les batteries ne sont plus sollicitées pour recharger le banc de supercondensateurs pendant les phases de décélération, les résultats sont meilleurs pour la stratégie évoluée que pour la stratégie de base, notamment pour la consommation électrique et le dimensionnement en énergie et en puissance (en charge) du banc de batteries (Figure 4-29.a, b, e, g). De plus, bien que cette stratégie ait toujours tendance à recharger un peu trop le banc de supercondensateurs et à passer en mode de limitation lorsque $u_{sc} = U_{sc_max}$, le banc de batteries absorbe des courants plus faibles que pour la stratégie de base (Figure 4-27.C.a), (cf. Figure 4-20.c).

Pour la stratégie « fonction des résistances », les résultats sont bien meilleurs pour la stratégie évoluée, notamment pour les pertes, l'énergie à stocker pour un dimensionnement du banc batteries en puissance, et pour le courant efficace du banc de batteries (Figure 4-29.c, d, f, g). Ceci est dû au fait que le banc de supercondensateurs n'atteint plus sa tension basse et que les batteries n'ont plus à assurer seules la traction du véhicule.

Une autre conséquence bénéfique pour les batteries est qu'elles ne sont plus sollicitées dans les classes de courants supérieures à 50 A (Annexe J), (cf. Figure 4-20.a).

Pour la stratégie « avec saturation du courant », les résultats sont meilleurs pour la stratégie évoluée, notamment pour le dimensionnement en puissance de décharge (Figure 4-29.e), elle est cependant en 4^{ème} position sur ce critère (Annexe J).

Les résultats de la stratégie « fonction de l'accélération » ne présentent pas de différences notables entre sa version de base et sa version évoluée. On peut tout de même noter une amélioration concernant l'énergie à stocker pour un dimensionnement en puissance en décharge (Figure 4-29.f).

4.3.4. Influence des paramètres à fixer

Dans les stratégies élaborées précédemment, certains paramètres doivent être fixés. Dans cette sous-partie, nous allons nous intéresser à ces paramètres et voir comment ils sont influents sur les critères étudiés. Les deux paramètres étudiés seront en particulier : la fréquence de coupure du filtre passe-bas pour la stratégie « de filtrage » (Figure 4-30, Figure 4-31) et la largeur de la fenêtre glissante (Figure 4-32) pour le calcul du courant moyen de traction pour la stratégie « avec saturation du courant ».

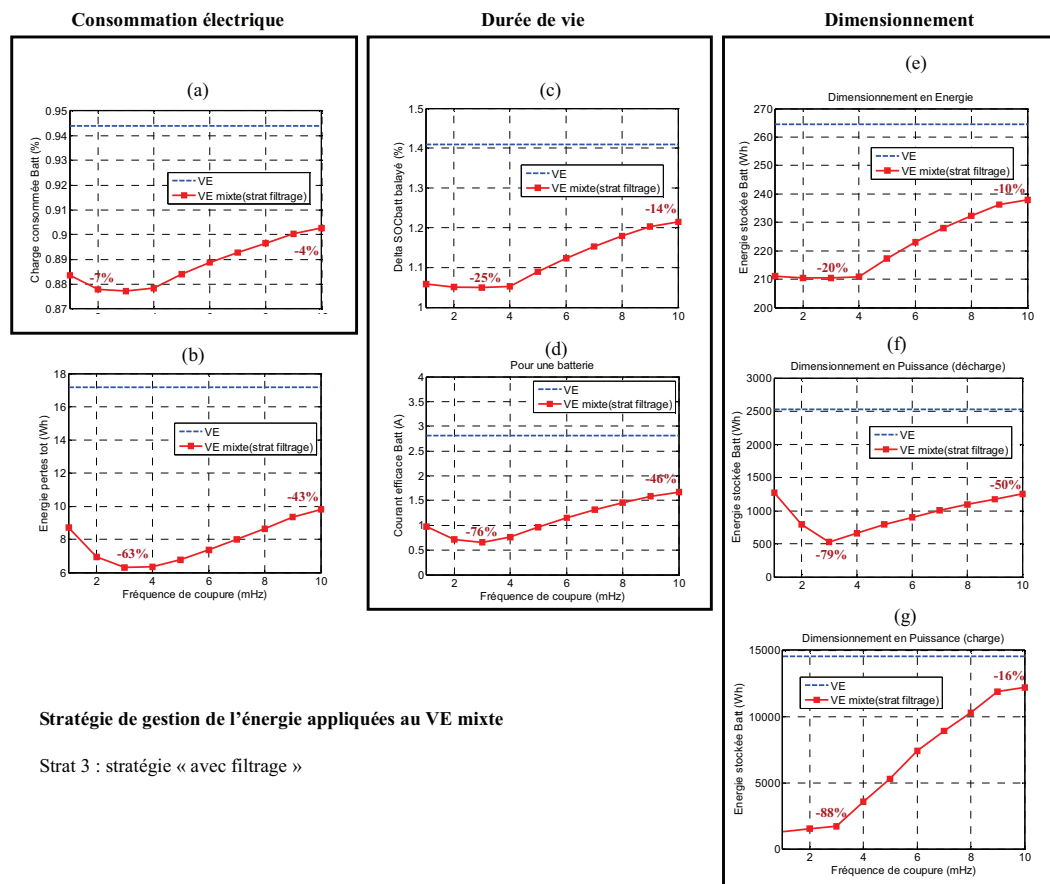


Figure 4-30. Influence de la fréquence de coupure

4.3.4.1. Influence de la fréquence de coupure

Pour la stratégie « de filtrage », la fréquence de coupure du filtre doit être fixée. Jusqu'à présent, nous l'avons fixée à 6 mHz. La Figure 4-30 donne les critères de comparaison pour différentes fréquences de coupure (de 1 mHz à 10 mHz). Ces fréquences de coupure sont relativement faibles, de l'ordre de quelques mHz. En effet, les raies du spectre du courant de traction se concentrent pour des fréquences n'excédant pas quelques Hz (Figure 4-31.a).

Les performances de l'association batteries / supercondensateurs, sur le trajet considéré, ont tendance à être meilleures pour des fréquences de coupure comprise entre 0 et 3 mHz. Au-delà de 3 mHz, les performances se dégradent de façon relativement linéaire avec la fréquence.

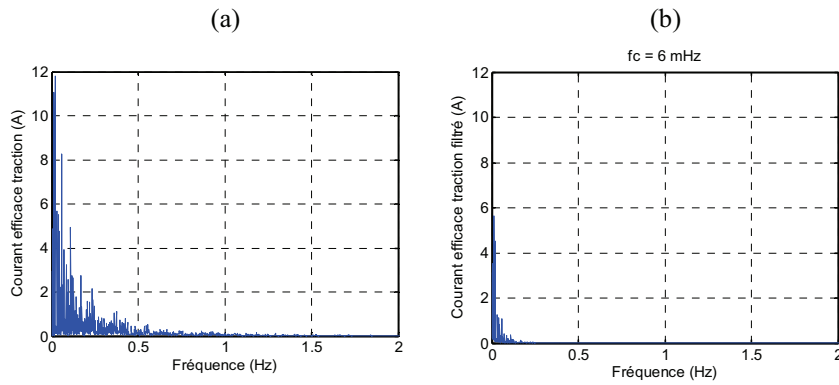


Figure 4-31. Spectres du courant de traction non filtré et filtré

4.3.4.2. Influence de la largeur de la fenêtre glissante

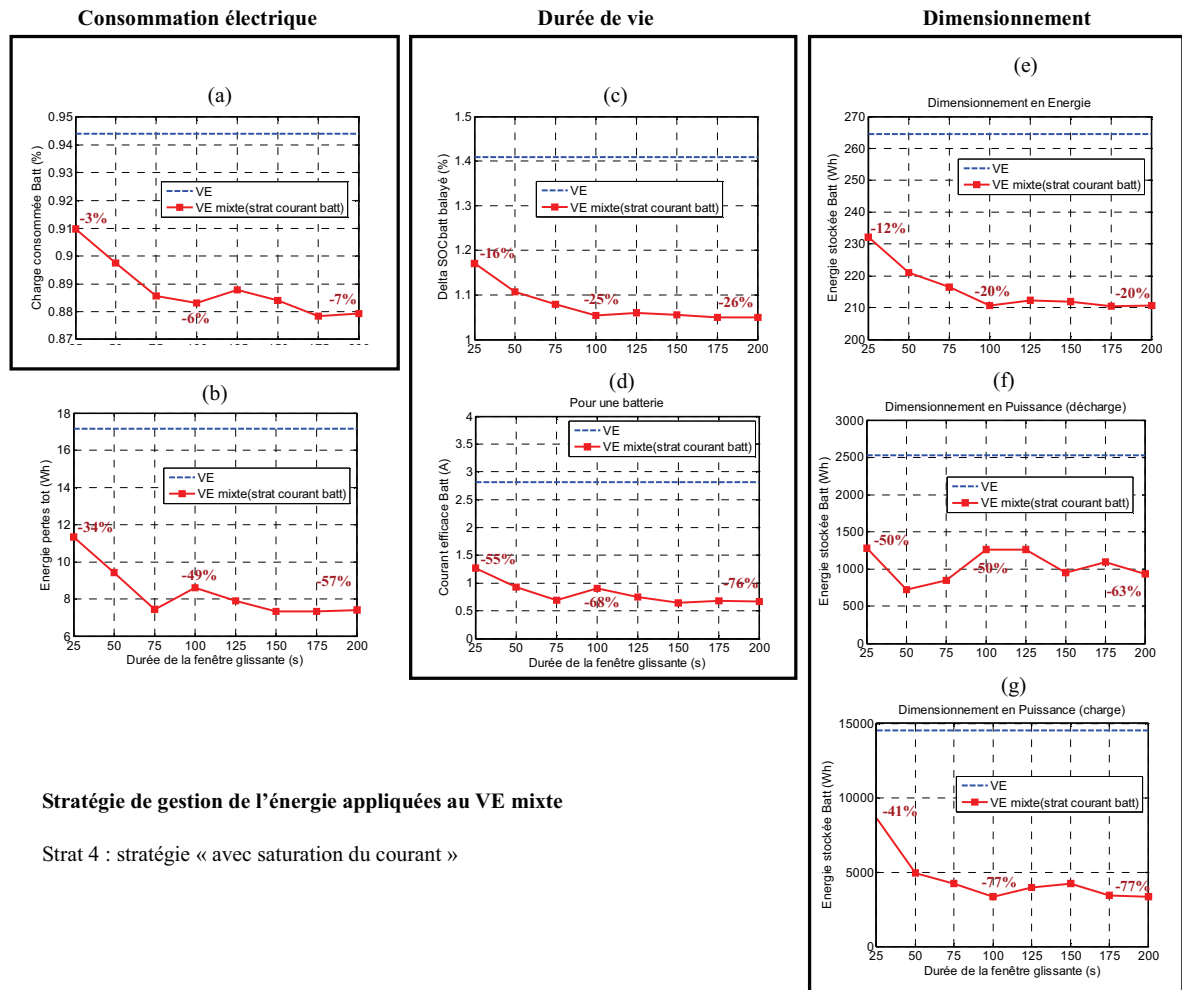
Pour la stratégie «avec saturation du courant», la largeur de la fenêtre glissante utilisée pour le calcul de la valeur moyenne du courant de traction doit être fixée. Jusqu'à présent, nous l'avons fixée à 100 s.

La Figure 4-32 donne les critères de comparaison pour différentes largeurs de fenêtre glissante (de 25 à 200 s). Nous avons limité cette largeur à 200 s, qui correspond à la durée d'un cycle ECE. Les performances de l'association batteries / supercondensateurs, sur le trajet considéré, ont tendance à être meilleures jusqu'à une largeur de fenêtre glissante de 100 s. Pour une fenêtre glissante comprise entre 100 et 200 s, les performances sont relativement semblables.

4.3.5. Influence du cycle

Jusqu'à présent, les deux véhicules étudiés ont été comparés sur un seul trajet, composé de 4 trajets ECE urbains. Nous allons maintenant comparer les deux véhicules sur un cycle urbain ARTURB, cycle représentatif des conditions de conduite réelles en cycle urbain (Figure 4-33), [ANDRE 98]. Les résultats de simulations des deux véhicules sont donnés en Annexe J.

Comme sur le cycle ECE (cf. Figure 4-29), les performances du VE mixte, sur l'ensemble des critères de comparaison et pour toutes stratégies mises en place, sont meilleures que du VE avec batterie seules (Figure 4-34). Si maintenant, on compare les stratégies les unes par rapport aux autres, on constate que les performances de la stratégie « fonction de l'accélération » se sont dégradées. Cette stratégie qui semblait la meilleure sur le trajet composé de 4 cycles ECE passe en 4^{ème} position pour l'énergie à stocker pour un dimensionnement en puissance basée sur la décharge et pour la distribution du courant du banc de batteries (Figure 4-34.f). Ceci est dû au retard induit par l'estimation de l'accélération qui a une influence sur la stratégie.



Stratégie de gestion de l'énergie appliquées au VE mixte

Strat 4 : stratégie « avec saturation du courant »

Figure 4-32. Influence de la largeur de la fenêtre glissante

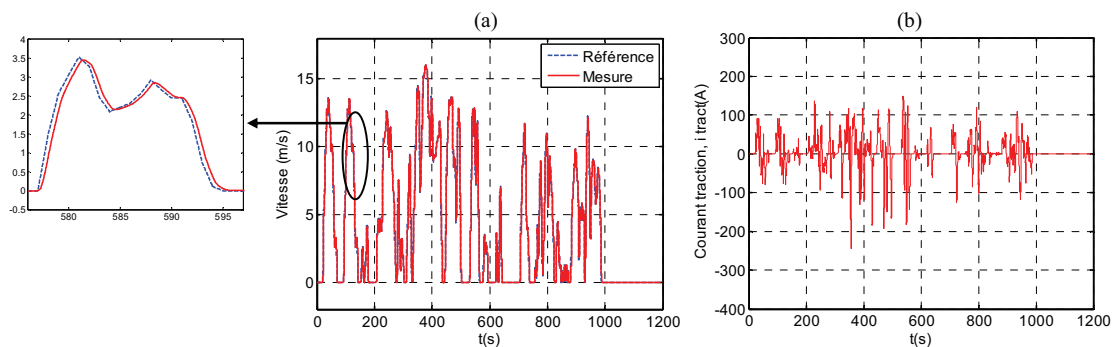


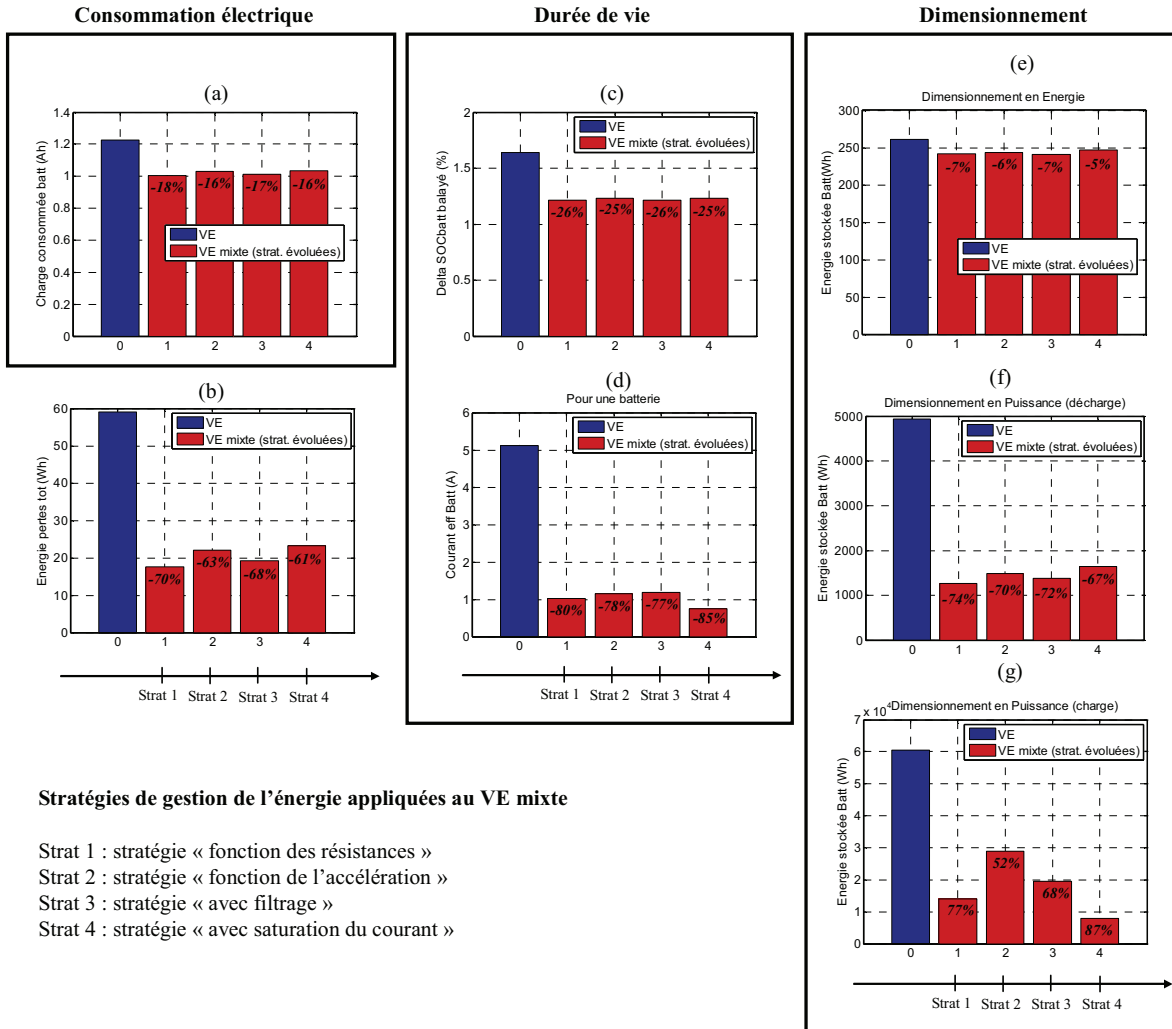
Figure 4-33. Vitesse et courant de traction sur 4 cycles ECE

En effet, les supercondensateurs fournissent la puissance fonction de l'accélération P_{acc} en retard. Étant donné que le banc de batteries fournit le reste de la puissance de traction, il peut être amené à devoir absorber ou fournir des pics de puissance si les fluctuations de vitesse et donc d'accélération sont rapides, comme c'est le cas sur le cycle ARTURB.

4.3.6. Bilan

De façon générale, les stratégies évoluées ont tendance à favoriser la recharge des supercondensateurs (recharge à l'arrêt, recharge par la récupération d'énergie au freinage) et permettent d'éviter de se retrouver en mode de limitation, améliorant ainsi les performances du SSE électrique mixte. En

effet, globalement sur les deux trajets considérés, 4 cycles ECE et 1 cycle ARTTURB, et à la vue des résultats, l'association de supercondensateurs et de batteries permettrait de réduire légèrement la consommation électrique du banc de batteries, de réduire de façon importante son dimensionnement que ce soit en énergie ou en puissance et permettrait également d'augmenter sa durée de vie.



Stratégies de gestion de l'énergie appliquées au VE mixte

- Strat 1 : stratégie « fonction des résistances »
- Strat 2 : stratégie « fonction de l'accélération »
- Strat 3 : stratégie « avec filtrage »
- Strat 4 : stratégie « avec saturation du courant »

Figure 4-34. Comparaison des deux véhicules sur le cycle ARTTURB

Pour les stratégies « de filtrage », et « avec saturation du courant », la fréquence de coupure du filtre et la largeur de la fenêtre glissante pour le calcul du courant moyen de traction doivent respectivement être fixées. Le choix de ces deux paramètres a une influence sur les performances du SSE électrique mixte sur l'ensemble des critères considérés. Ainsi, sur le trajet considéré (4 trajets ECE), le choix de la fréquence de coupure ($f > 3\text{mHz}$) a une très forte influence sur l'énergie à stocker pour un dimensionnement en puissance, notamment basé sur la charge, et également sur le courant efficace du banc de batteries. De façon générale, plus la fréquence de coupure est choisie élevée, plus les performances sont dégradées. Le choix de la largeur de la fenêtre glissante entre 25 et 100 s a une influence sur le dimensionnement en puissance basée sur la charge, sur les pertes et le courant efficace du banc de batteries. De façon générale, cette influence est fortement réduite et les performances sont meilleures pour une fenêtre glissante choisie supérieure à 100 s.

Chaque stratégie a également été testée sur un trajet ARTTURB. Il en ressort que la stratégie « fonction de l'accélération » est très sensible aux fluctuations de vitesse (due à l'estimation de

l'accélération). De manière générale, plus ces fluctuations sont importantes, plus ses performances se dégradent.

Il est important de noter que ces tendances se limitent au cadre de trajets urbains, pour lesquels les arrêts sont fréquents. En effet, le banc de supercondensateurs peut facilement être rechargé par le banc de batteries au cours de ces arrêts.

4.4. Influence des stratégies sur le dimensionnement

Nous avons vu, dans les deux parties précédentes, l'influence des stratégies de gestion de l'énergie sur différents critères. Nous allons ici nous intéresser plus particulièrement à leur influence sur le dimensionnement des batteries. L'idée consiste à redimensionner les batteries en tenant compte de cette influence, et ensuite de comparer le VE mixte, avant et après redimensionnement, sur l'ensemble des critères étudiés précédemment (Figure 4-35).

4.4.1. Redimensionnement du banc de batteries du VE mixte

Le trajet dimensionnant est à nouveau le trajet composé de 100 cycles urbains ECE. On a vu que sur ce cycle, les stratégies les plus intéressantes en termes de dimensionnement du banc de batteries sont la stratégie « fonction de l'accélération » et celle « fonction des résistances internes » (cf. Figure 4-29).

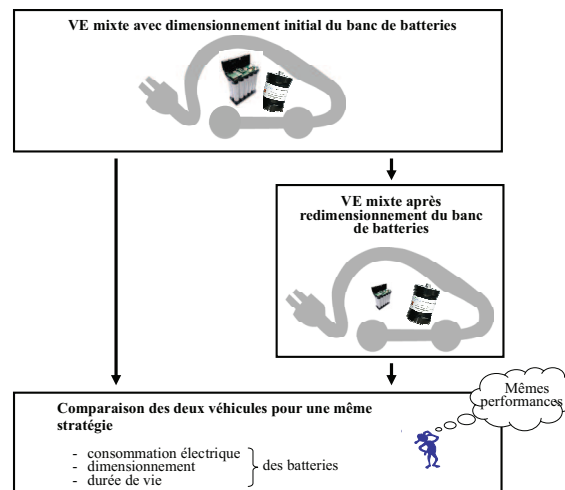


Figure 4-35. Approche

Pour ces deux stratégies, le banc de batteries va être redimensionné en fonction des énergies et puissances mises en jeu. L'ajout des supercondensateurs va permettre de redimensionner le banc de batteries de manière plus réaliste. En effet, il permet de réduire forment l'énergie à stocker pour répondre au besoin en puissance. Ainsi, le dimensionnement le plus contraignant devient le dimensionnement en énergie. Ce redimensionnement du banc de batteries permet de respecter pleinement le cahier des charges initial, et notamment une autonomie de 100 km.

Les dimensionnements des bancs batteries pour les deux stratégies sont obtenues à partir des équations (58), (59) et (60) (cf. §4.1.2.1) (Tableau 4-3). Les nombres de batteries total, en série, et en parallèle sont arrondis au nombre entier supérieur.

Tableau 4-3. Redimensionnement du banc de batteries

Véhicules étudiés	Nombre total de batteries	Nombre de batteries en série	Nombre de batteries en parallèle
VE avec batteries seules	70	7	10
VE mixte (Strat 1)	28	7	4
VE mixte (Strat 2)	28	7	4

Strat 1 : stratégie « fonction de l'accélération »

Strat 2 : stratégie « fonction des résistances internes »

4.4.2. Comparaison des performances pour les deux dimensionnements

Le VE mixte avec le dimensionnement du banc de batteries initial est comparé à celui après redimensionnement du banc de batteries, sur l'ensemble des critères étudiés précédemment. Il est important de noter que la masse du banc de batteries a été considérée dans la masse totale du véhicule. Ainsi le VE avant redimensionnement sera plus lourd que celui après redimensionnement.

4.4.2.1. Stratégie 1 : fonction de l'accélération

Les résultats de simulation du VE mixte après redimensionnement sont donnés Figure 4-36. La mise en œuvre de cette stratégie est indépendante du dimensionnement du banc de batteries. Etant donné que le redimensionnement permet d'alléger le banc de batteries et que la puissance fournie par le banc de supercondensateur est directement proportionnelle à la masse du véhicule ($P_{scp} = M_{eq} a_{veh} v_{veh}$, cf. § 4.2.2.3), on peut remarquer que les courants du banc de supercondensateurs sont légèrement inférieurs à ceux du VE mixte avant redimensionnement (Figure 4-36.a et cf. Figure 4-27.B.a). Par conséquent, le banc de supercondensateurs se décharge moins (Figure 4-36.b). Par contre, la puissance fournie et reçue par le banc de batteries est identique.

Les performances des deux véhicules pour les différents critères étudiés sont rassemblées dans le Tableau 4-5. La consommation électrique et le dimensionnement en énergie et en puissance du banc de batteries sont quasi identiques pour les deux véhicules.

Concernant la durée de vie du banc de batteries, la distribution de courant des deux véhicules est quasi identique (Figure 4-37). Par contre, étant donné qu'on a moins de batteries, on a tendance à les solliciter d'avantage en profondeur.

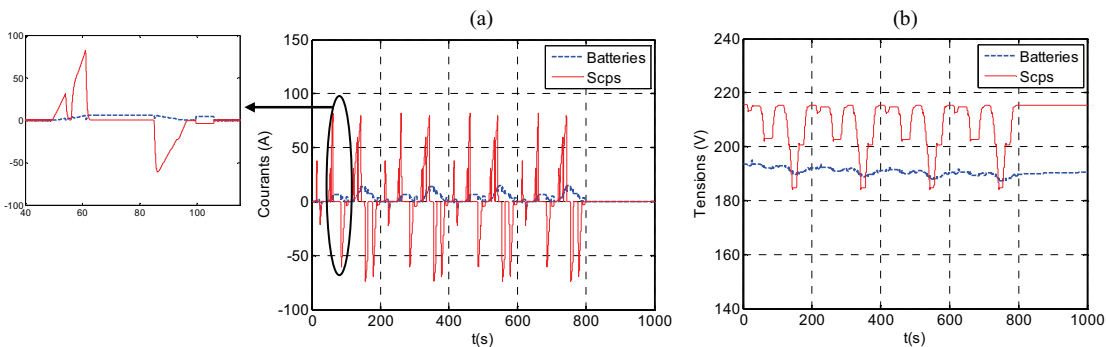


Figure 4-36. Résultats de simulation après redimensionnement (Stratégie 1)

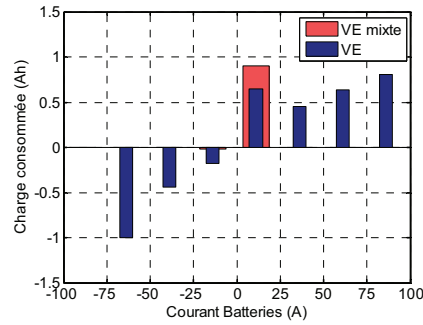


Figure 4-37. Distribution de courant après redimensionnement (Stratégie 1)

Tableau 4-4. Comparaison du VE mixte pour deux dimensionnements de bancs de batteries (Stratégie 1)

	ΔQ_{batt_consom} (mAh)	E_{pertes_SSE} (Wh)	$\Delta SOC_{batt_balayée}$ (%)	I_{batt_eff} (A) pour une batterie	$E_{dim_energie}$ (W.h)	$E_{dim_puissance}$ (décharge) (W.h)	$E_{dim_puissance}$ (charge) (W.h)
Avec dimensionnement initial	879 (-6,5%*)	7 (-63%*)	1,05 (-25%*)	0,54 (-81%*)	212 (-20%*)	359 (-86%*)	1782 (-88%*)
Après redimensionnement	886 (-6%*)	7 (-63%*)	2,65 (+88%*)	1,31 (-53%*)	210 (-20%*)	359 (-86%*)	1622 (-89%*)

* Par rapport au VE avec batteries seules

Ainsi la gamme d'état de charge balayée $\Delta SOC_{batt_balayée}$ et le courant efficace d'une batterie $I_{el_batt_eff}$ sont plus importants pour le VE mixte après redimensionnement.

4.4.2.2. Stratégie 2 : stratégie fonction des résistances

Les résultats de simulation du VE mixte après redimensionnement sont donnés Figure 4-38. Cette stratégie est directement liée à la résistance interne équivalente du banc de batteries, donc au dimensionnement du banc de batteries. Etant donné que le banc de batteries après redimensionnement utilise moins de branches parallèles (4 au lieu de 10), la résistance interne du banc de batteries après redimensionnement ($R_{batt_redim} \approx 152 \text{ m}\Omega$) est plus importante que celle avant redimensionnement ($R_{batt} \approx 60,7 \text{ m}\Omega$). Ainsi pendant les phases de d'accélération et à vitesse constante, pour minimiser les pertes dans le SSE électrique mixte, le banc de batteries sera moins sollicités pour le VE mixte après redimensionnement. Par conséquent, le banc de supercondensateurs est plus sollicité et nécessite une recharge un peu plus importante lorsque le véhicule est à l'arrêt (Figure 4-38.a). Cette différence est notamment visible dans la distribution de courant du banc de batteries qui est plus faible dans la classe de courant 0-25 A et plus importante dans la classe de courant 25-50A (recharge à l'arrêt) pour le VE mixte après redimensionnement (Figure 4-39, cf. Figure 4-27.A.a).

Les performances des deux véhicules pour les différents critères étudiés sont rassemblées dans le Tableau 4-5. Comme précédemment, la consommation électrique et le dimensionnement en énergie du banc de batteries sont quasi identiques pour les deux véhicules. Pour les mêmes raisons que précédemment, la gamme d'état de charge balayée $\Delta SOC_{batt_balayée}$ et le courant efficace d'une batterie $I_{el_batt_eff}$ sont plus importants pour le VE mixte après redimensionnement.

L'énergie à stocker pour un dimensionnement en puissance (en décharge) et les pertes du banc de batteries sont plus élevées. Ceci est dû au fait que le courant de recharge à l'arrêt du banc de batteries est plus important pour le VE mixte après redimensionnement (Figure 4-38.a).

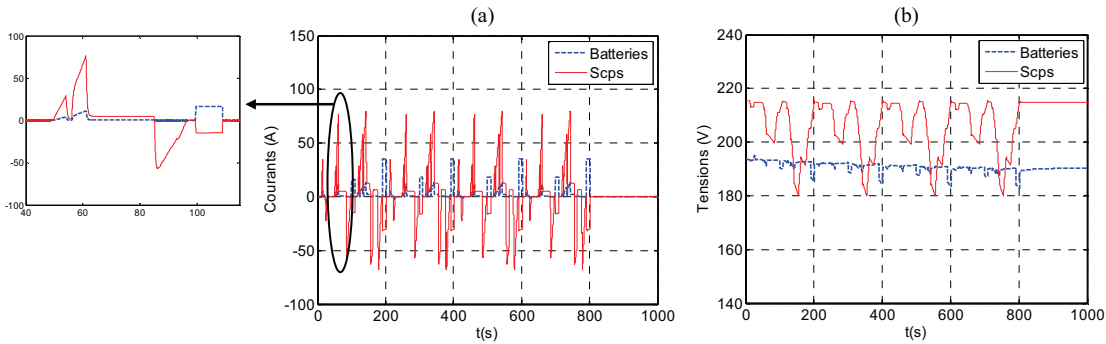


Figure 4-38. Résultats de simulation après redimensionnement (Stratégie 2)

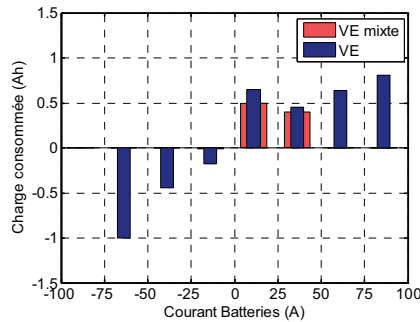


Figure 4-39. Distribution de courant après redimensionnement (Stratégie 2)

Tableau 4-5. Comparaison du VE mixte pour deux dimensionnements de bancs de batteries (Stratégie 2)

	ΔQ_{batt_consom} (mAh)	E_{pertes_SSE} (Wh)	$\Delta SOC_{batt_balayé}$ (%)	I_{batt_eff} (A) pour une batterie	$E_{dim_energie}$ (W.h)	$E_{dim_puissance}$ (décharge) (W.h)	$E_{dim_puissance}$ (charge) (W.h)
Avec dimension- nement initial	884 (-6,5%*)	6 (-68%*)	1,04 (-25%*)	1,30 (-75%*)	209 (-21%*)	714 (-72%*)	2033 (-86%*)
Après redimension- nement	892 (-5,5%*)	9 (-50%*)	2,67 (+89%*)	2,09 (-26%*)	209 (-21%*)	878 (-65%*)	1442 (-90%*)

* Par rapport au VE avec batteries seules

4.4.3. Bilan

Pour le trajet considéré, on peut dire que le redimensionnement du banc de batteries a peu d'impact sur la consommation électrique, sur le dimensionnement en énergie et également sur le dimensionnement en puissance, notamment si la stratégie mise en œuvre est indépendante du dimensionnement.

Par contre, à la vue des résultats et pour le trajet considéré, le redimensionnement du banc de batteries tend à réduire sa durée de vie : augmentation de la gamme d'état de charge balayée et augmentation du courant efficace.

Un redimensionnement du banc batteries a également été réalisé pour les autres stratégies évoluées. Les résultats de simulations sont donnés en Annexe K.

4.5. Validation expérimentale sur le microbus électrique mixte

Dans cette sous partie, nous avons validé expérimentalement la stratégie évoluée « avec saturation du courant » sur le microbus électrique mixte présenté aux chapitres précédents. En effet, bien que l'architecture du véhicule soit différente de celle de la voiture électrique mixte, le principe de la stratégie peut être appliquée à l'identique. Les résultats expérimentaux sont donnés Figure 4-40.

Dans les stratégies évoluées, la recharge du banc de supercondensateurs se fait à courant constant dès que le véhicule est à l'arrêt. Le courant de recharge est calculé de manière à ce que le banc de supercondensateurs soit entièrement rechargé en 10 s. Pour notre application, la recharge du banc de supercondensateurs se fait à courant constant mais avec une valeur de courant fixe (100 A) (Figure 4-40.c). Le trajet considéré présentant peu d'arrêts, le banc de supercondensateurs est notamment rechargé en fin de parcours. La fenêtre glissante sur laquelle est calculé le courant de saturation $i_{h_batt_sat}$ est de 100 s. On peut remarquer que pour le trajet effectué, ce courant de saturation varie très peu (Figure 4-40.c).

La distribution de courant du banc de batteries du véhicule (VE mixte) est comparée à celle du même véhicule, pour lequel le banc de supercondensateurs n'est pas utilisé (VE) (Figure 4-41).

Cette distribution est plus intéressante en termes de durée de vie du banc de batteries pour le VE mixte que pour le VE. En effet, pour le VE mixte, elle se concentre principalement dans les classes de courant comprises entre 0 et 150A. On peut cependant remarquer que la classe de courant 100-150A est d'avantage sollicitée pour le VE mixte que pour le VE. Ceci est dû aux phases de recharge du banc de supercondensateurs à l'arrêt qui s'effectue sous un courant de 100A.

Les résultats expérimentaux pour le microbus où seules les batteries sont activées sont donnés en Annexe L. Les stratégies de base « fonction des résistances », et « de filtrage », ainsi que la stratégie évoluée « fonction de l'accélération » ont également été appliquées sur le microbus électrique mixte. Les résultats expérimentaux sont donnés en Annexe L.

Il est important de noter que le trajet considéré étant réalisé sur un trajet réel, il n'est pas parfaitement reproductible entre deux essais. De plus, pour chaque essai réalisé l'état de charge initial du banc de batteries n'est pas le même, et le courant des accessoires n'est pas rigoureusement identique. Ainsi la comparaison des résultats donne uniquement les tendances.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre, différentes stratégies de gestion de l'énergie ont été mises en place pour la voiture électrique mixte. L'ensemble de ces stratégies utilise la même structure de commande.

Pour pouvoir évaluer l'apport des supercondensateurs associés à des batteries, la voiture électrique mixte a été comparée à un véhicule de référence identique sans supercondensateurs. Cette comparaison a été effectuée sur différents critères donnant des informations en termes de consommation électrique, dimensionnement et durée de vie du banc de batteries.

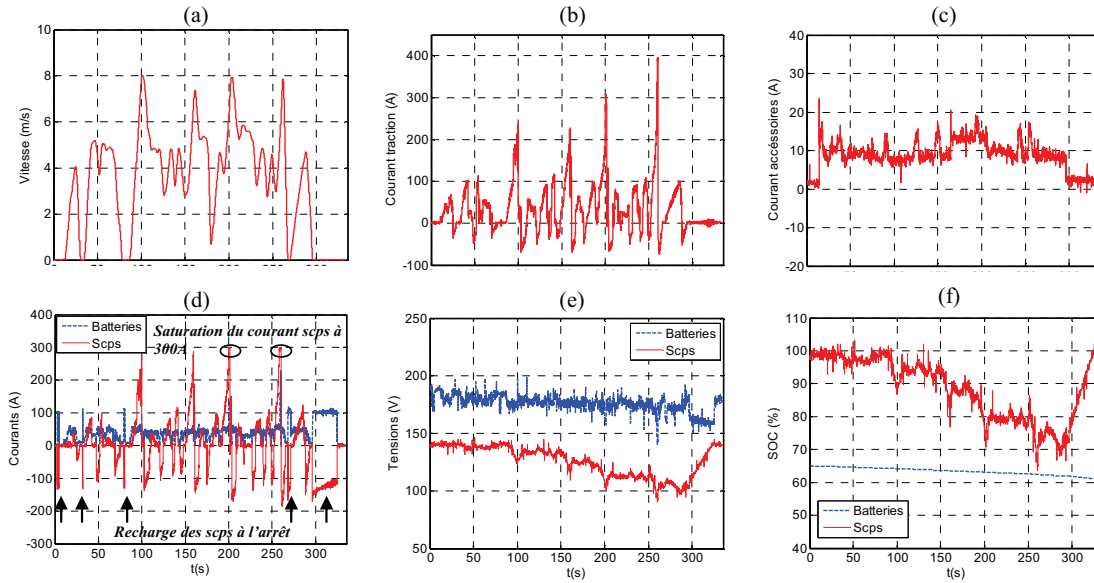


Figure 4-40. Résultats expérimentaux pour la stratégie évoluée « avec saturation du courant »

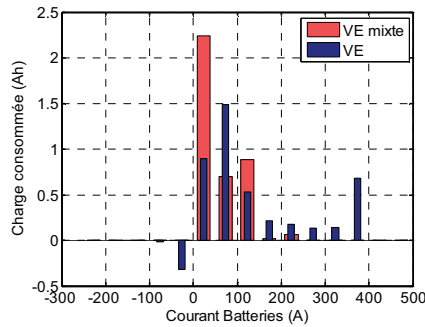


Figure 4-41. Distribution du courant du banc de batteries pour le VE et le VE mixte

Quatre stratégies de base puis évoluées ont été proposées, leurs points forts et faibles sont donnés dans le Tableau 4-6.

Ces stratégies ont été validées par simulation sur la voiture électrique mixte et certaines ont été validées expérimentalement sur le microbus électrique mixte réel.

Pour l'ensemble des stratégies, la voiture électrique mixte présente de meilleures performances sur les critères étudiés que la voiture électrique avec batteries seules. Il apparaît cependant que chaque stratégie n'a pas la même influence sur les critères considérés.

Chaque stratégie a également été testée sur deux trajets urbains différents (ECE et ARTURB). Il en ressort que certaines stratégies sont meilleures sur un cycle et moins bonnes sur l'autre, mais qu'au global le VE mixte reste toujours plus intéressant que le VE avec batteries seules.

Une étude a été menée plus particulièrement sur l'influence des stratégies sur le dimensionnement du banc de batteries de la voiture électrique mixte. Le banc de batteries a été redimensionné pour deux stratégies et les performances du véhicule sur les différents critères ont été comparées avant et après redimensionnement. De façon générale, ce redimensionnement permet d'alléger le banc de batteries et, a peu d'impact sur la consommation électrique, par contre les batteries sont d'avantage sollicitées. Il s'agit donc de faire un compromis entre dimensionnement et durée de vie des batteries. Il est également important de noter que le VE mixte après redimensionnement reste toujours plus intéressant que le VE mixte avec batteries seules, sauf pour la gamme d'état de charge balayée qui est plus importante pour le VE mixte après redimensionnement.

Il est important de noter que ces tendances se limitent au cadre des deux trajets urbains ECE et ARTURB, qu'elles ont été obtenues pour un dimensionnement particulier de batteries, un seul type de batteries et pour deux véhicules spécifiques. Il serait donc intéressant de réaliser une étude similaire sur un trajet extra-urbain, avec d'autres batteries (Lithium-ion, Zébra...), sur un autre véhicule utilisant une autre architecture et voir comment évoluent ces tendances.

Tableau 4-6 Points forts et points faibles des différentes stratégies de gestion de l'énergie

Stratégies	Points forts	Points faibles
« Fonction des résistances »	- Pas de paramètres à fixer	- Dépendante du dimensionnement du banc des batteries et du banc de supercondensateurs
« Fonction de l'accélération »	- Pas de paramètres à fixer - Indépendante du dimensionnement	- Très sensible aux fluctuations rapides de l'accélération - Estimation de l'accélération
« Filtrage »	- Indépendante du dimensionnement	- Variations des performances avec la fréquence de coupure
« Avec saturation du courant »	- Indépendante du dimensionnement	- Variations des performances avec la largeur de la fenêtre glissante

Conclusion Générale

Dans cette thèse, un véhicule avec Système de Stockage d'Énergie (SSE) électrique mixte ou véhicule mixte est défini comme un véhicule qui utilise plusieurs sources d'énergie électrique pour assurer sa traction. Ces sources peuvent être associées de façons passives ou actives. Il existe de nombreuses architectures possibles d'association, d'autant plus si le nombre de sources est important. L'objectif de cette thèse a été de proposer une méthodologie d'étude des associations de sources électriques pour VEs et VEHS de façon à en déduire des règles de modélisation, de commande et de dimensionnement.

Le premier chapitre nous a permis de montrer l'intérêt du stockage mixte de l'énergie électrique pour répondre aux cahiers des charges des transports terrestres du futur. Associer deux sources d'énergie électrique, présentant des caractéristiques complémentaires, permettrait d'allier leurs avantages respectifs pour obtenir un système global ayant de meilleures performances. L'association batteries / supercondensateurs a été utilisée pour des applications de véhicules électriques et hybrides mixtes étudiés dans les chapitres suivants.

Dans le deuxième chapitre, à partir des architectures courantes utilisées notamment pour l'association batteries / supercondensateurs, une méthodologie de modélisation, utilisant la Représentation Énergétique Macroscopique (REM), a été développée pour des VEs mixtes à 3 sources électriques. Une architecture et une REM générales, capables de décrire l'ensemble de ces véhicules, ont été établies. La REM générale permet de mieux analyser le système, de simuler l'ensemble des architectures avec un seul et même programme, et ainsi de comparer facilement plusieurs architectures pour un même véhicule. L'architecture générale pourrait permettre également de tester différentes architectures sur une même plateforme expérimentale. La méthodologie de modélisation a été étendue à des véhicules à 4 sources électriques, et pourrait être développée de façon plus générale à des véhicules à N sources électriques. Cette méthodologie a été appliquée à deux VEs mixtes ayant des architectures différentes (une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte), puis a été étendue à un VEH mixte de type série et à un métro électrique à 4 sources électriques.

Le troisième chapitre s'est focalisé sur la structuration de la commande de VEs et VEHS mixtes, en utilisant à nouveau la REM. La méthodologie utilisée permet de bien différencier structure de commande (commande locale) et stratégie de gestion de l'énergie (commande globale). Un principe de superposition a été mis en place pour prendre en compte dans une même structure de commande les différentes possibilités de commande ou les différents modes de fonctionnement du système. Il a été appliqué à chaque véhicule présenté au deuxième chapitre. La structure de commande de la voiture électrique mixte a été validée par simulation et en temps réel et celle du microbus électrique mixte par simulation et en expérimentation sur le véhicule réel. La structure de commande de la voiture électrique hybride mixte a été validée par simulation et celle du métro électrique mixte par simulation et partiellement en temps réel. Les stratégies de gestion de l'énergie mises en place dans ce chapitre étaient relativement simples.

Le quatrième chapitre s'est justement intéressé à des stratégies de gestion de l'énergie plus complexes, et à leur influence sur des critères de consommation d'énergie électrique, durée de vie et dimensionnement du banc de batteries pour un véhicule mixte batteries / supercondensateurs. Quatre stratégies, de base puis évoluées, ont été proposées et vérifiées par simulation sur la voiture électrique mixte; certaines d'entre elles ont été validées expérimentalement sur le microbus électrique mixte réel. Pour l'ensemble des stratégies, la voiture électrique mixte présente de meilleures performances sur les critères étudiés que la voiture électrique avec batteries seules sur les deux cycles étudiés. Il apparaît cependant que chaque stratégie n'a pas la même influence sur les critères considérés. L'ajout de supercondensateurs a notamment permis de redimensionner le banc de batteries et de l'alléger sans augmenter pour autant sa consommation d'énergie électrique. Cependant étant donné qu'il y a moins

de batteries, et qu'elles sont donc d'avantage sollicitées, un compromis est à faire entre dimensionnement et durée de vie des batteries.

Les perspectives de ces travaux peuvent être nombreuses tant les architectures de SSE électriques mixtes sont multiples et se complexifient lorsque l'on rajoute des sources électriques.

D'un point de vue méthodologie, un logiciel de simulation permettant de comparer différentes architectures de véhicules mixtes pourrait être mis en place en se basant sur la méthodologie de modélisation développée. De la même manière, une plateforme expérimentale pourrait être réalisée pour tester sur un même banc expérimental, différentes architectures de véhicules mixtes en se basant sur l'architecture générale développée. Pour l'ensemble des véhicules mixtes étudiés, nous avons pris l'hypothèse que deux des sources qui assurent la traction sont des sources de tension. Il serait intéressant de généraliser l'étude en introduisant d'avantage de sources de courant. Les bases ont été posées pour les véhicules mixtes à 4 sources électriques. Une étude plus approfondie pourrait être menée notamment sur la commande de ces véhicules afin de prendre en compte les différentes possibilités de commande. Concernant l'association batteries / supercondensateurs pour un usage véhicule, à long terme, lorsque l'on disposera de lois suffisamment fiables permettant d'établir la durée de vie d'une batterie en fonction des paramètres les plus influents, il serait intéressant de réaliser une étude d'optimisation afin de définir le meilleur compromis dimensionnement / durée de vie des batteries pour le meilleur bilan économique et écologique. Les retombées de ces travaux permettraient une meilleure insertion des systèmes de stockage dans les transports du futur et de réduire leurs empreintes environnementales.

D'un point de vue application, nous nous sommes limités dans les véhicules étudiés au stockage de l'énergie par batterie et supercondensateurs, il serait intéressant d'étudier d'autres associations utilisant d'autres stockeurs (volant d'inertie...) et d'autres types de batteries, telles que des batteries lithium-ion plus adaptées aux contraintes des véhicules. De plus, il serait intéressant de voir quelle est l'influence du modèle de batterie notamment sur les différentes stratégies développées. Enfin, La méthodologie de modélisation et de commande a été appliquée à des véhicules ayant des architectures spécifiques, sur des cycles exclusivement urbains. Il serait intéressant d'élargir l'étude à d'autres types de véhicules (VEH parallèle...) et d'utiliser d'autres cycles d'usage (extra urbain...).

Cette thèse fait partie des projets engagés par le réseau scientifique national MEGEVH et a permis une première étude sur les véhicules utilisant des SSE électriques mixtes. Elle s'est appuyée sur d'autres travaux MEGEVH et sera à son tour utilisée pour de futurs projets MEGEVH. Une thèse de MEGEVH-stratégie est d'ailleurs envisagée pour poursuivre les travaux menés sur les stratégies de gestion de l'énergie pour véhicules mixtes.

Annexes

Annexe A : Architectures de VEHS

Généralement, lorsque l'on classe les VEHS selon leur architecture, on distingue trois catégories : série, parallèle, et série-parallèle.

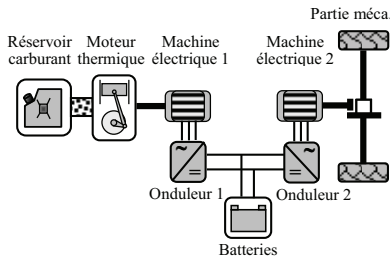
Hybride série – Une des principales caractéristiques de cette architecture est que le moteur thermique n'est pas lié mécaniquement aux roues (Figure 42.a). Ainsi, lorsque le moteur thermique est utilisé, il peut toujours être utilisé à son point de fonctionnement optimal. De plus, comme le groupe électrogène, les batteries et la machine électrique ne sont connectés que par des câbles, cette architecture présente une grande flexibilité dans l'agencement de ses différents composants. Le principal inconvénient de cette architecture est que le rendement de l'ensemble est faible. En effet, l'énergie servant à la traction du véhicule transite via le moteur thermique, la génératrice électrique, les convertisseurs, éventuellement la batterie, et la machine électrique. À noter qu'à performances équivalentes, malgré une bonne utilisation du moteur thermique, le VEH série consomme plus de carburant que les autres architectures de VEHS. Un autre inconvénient est que cette architecture nécessite l'utilisation de trois machines (le moteur thermique, la génératrice électrique et la machine électrique) dont une, la machine électrique, doit être de forte puissance pour assurer la traction du véhicule et satisfaire les besoins en vitesse et en accélération du véhicule. Le coût et l'encombrement de la chaîne de traction sont par conséquent, importants [CHAN 07], [EHSANI 07].

Hybride parallèle – Dans les VEHS de type parallèles, le moteur thermique est couplé mécaniquement à la machine électrique qui permet de l'assister (Figure 42.b). Parmi les structures existantes, on distingue les architectures parallèles à addition de couple et celles à addition de vitesse. Pour les architectures parallèles à addition de couple, les couples du moteur thermique et du moteur électrique s'additionnent afin de tracter le véhicule ou de recharger la batterie. Le moteur thermique et la machine électrique peuvent être placés sur le même arbre (addition de couple simple arbre) ou sur deux arbres différents (addition de couple double arbre). À ce moment là, il est possible de régler indépendamment la vitesse du moteur thermique de celle de la machine électrique ; l'addition de couple se fait au moyen de courroies, poulies ou engrenages. Pour les architectures parallèles à addition de vitesse, les vitesses du moteur thermique et de la machine électrique s'additionnent au moyen d'un train planétaire ou d'un transmoteur pour lequel le stator tourne.

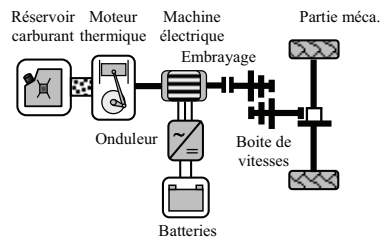
Étant donné que les couples des roues motrices sont directement fournis par les moteurs thermiques et électriques, l'avantage de l'architecture parallèle est qu'elle présente moins de pertes que l'architecture série. De plus, la traction ne nécessite l'utilisation que de deux machines (moteur thermique et machine électrique), ce qui permet de diminuer le poids et l'encombrement de la motorisation. Par contre, cette architecture ne permet pas une utilisation optimale du moteur thermique sur toute la gamme de vitesse du véhicule puisque celui-ci est couplé aux roues motrices. De plus, cette architecture est plus complexe et plus difficile à commander [CHAN 07], [ESHANI 07].

Hybride série-parallèle – Cette structure combine l'addition de couple et de vitesse du moteur thermique et de la machine électrique. Il existe différentes structures d'hybrides combinés, la plus connue est celle de la Toyota Prius (Figure 42.c) où le train planétaire réalise l'addition de vitesse et le moteur électrique 2, l'addition de couple. À basses vitesses, le moteur thermique ayant un mauvais rendement, c'est le moteur électrique 1 qui assure la traction du véhicule. Quand la vitesse du véhicule augmente, le couple du moteur thermique est fixé au moyen du moteur électrique 2, la vitesse du moteur thermique au moyen du moteur électrique 1, le point de fonctionnement ainsi fixé est choisi optimal, le rendement η est maximal. Le couple et la vitesse du moteur thermique sont fixés, donc la puissance est fixée indépendamment de la puissance demandée au niveau des roues.

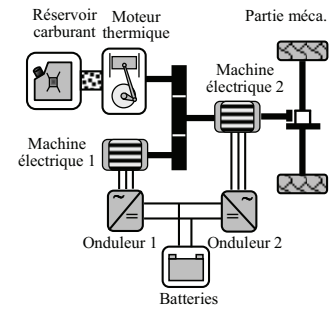
Cette structure complexe permet de réaliser séparément ou ensemble les différents modes opératoires des hybridations série et parallèle [OLSZEWSKY 06].



(a) Architecture d'un VEH série



(b) Architecture d'un VEH parallèle



(c) Architecture d'un VEH série-parallèle

Figure 42. Architectures de VEHS

Annexe B : Architectures possibles pour VE mixtes

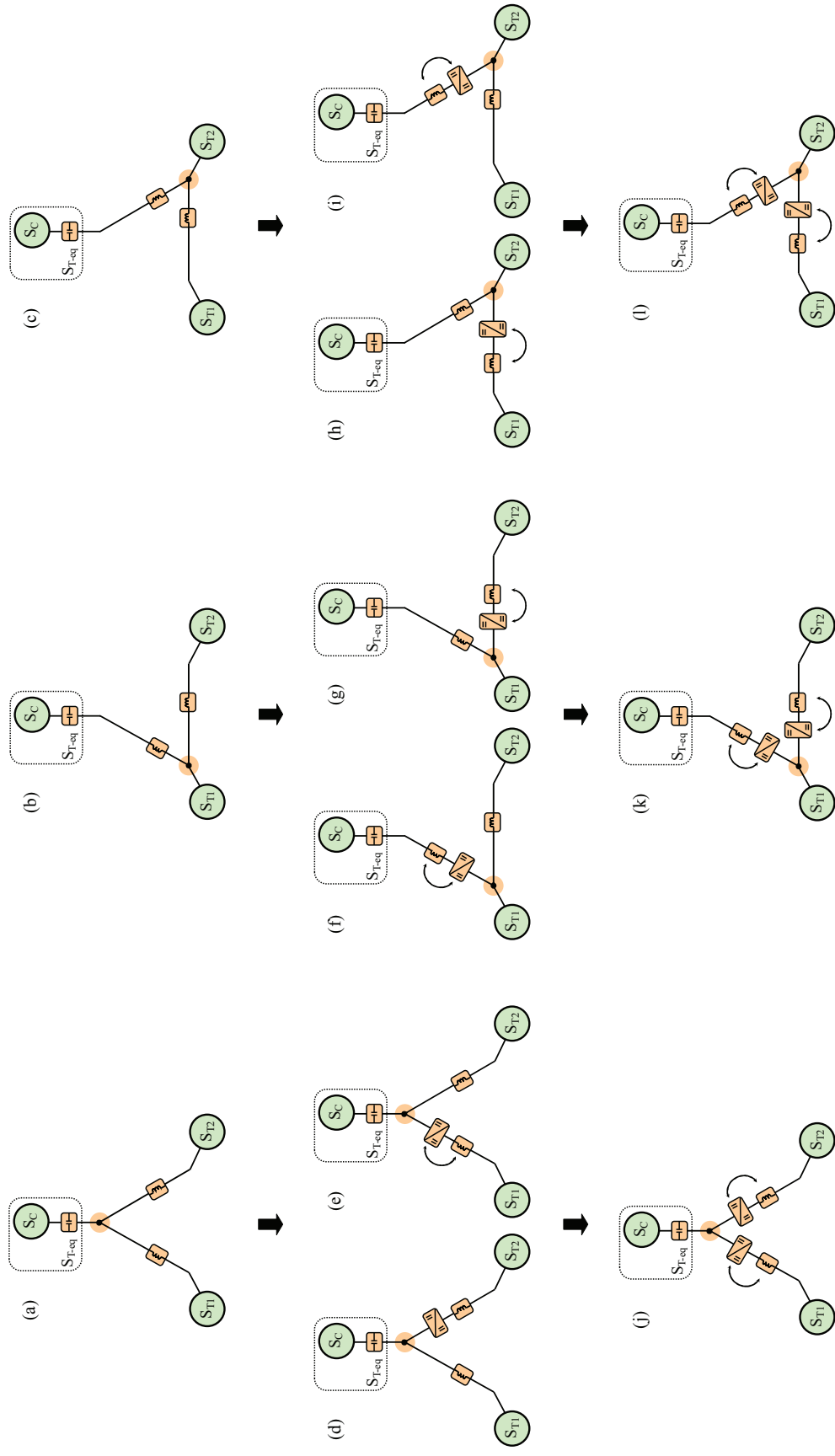


Figure 43. Architectures possibles pour un VE mixte avec bus continu contrôlé

Annexe C : Représentation Energétique Macroscopique

La Représentation Energétique Macroscopique (REM) a été développée par le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP) dans les années 2000. Ce formalisme est utilisé pour représenter des systèmes complexes, en respectant une description fonctionnelle [BOUSCAYROL 03].

Principe d'interaction

Le système se décompose en sous-systèmes en interactions (Tableau 7):

- sources d'énergie (ovales verts)
- éléments d'accumulation (rectangles orange barrés)
- éléments de conversion sans accumulation d'énergie (carrés, ronds, triangles oranges)
- éléments de couplage pour la distribution d'énergie (doubles carrés, ronds, triangles oranges)
- aiguilleurs qui permettent de passer d'un modèle à un autre [LHOMME 07].

Tous ces éléments sont interconnectés suivant le principe d'action-réaction. Le produit des variables d'action-réaction entre deux éléments donne la puissance instantanée échangée entre ces deux éléments (Figure 44) [BOUSCAYROL 00].

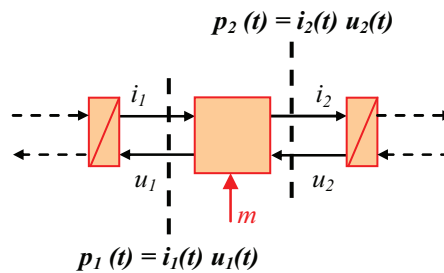


Figure 44. Calcul de la puissance instantanée

Principe de causalité

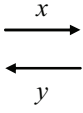
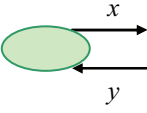
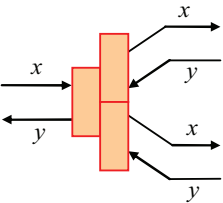
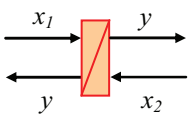
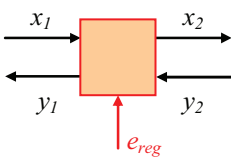
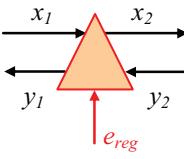
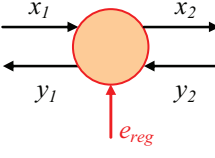
La causalité intégrale est la seule causalité considérée dans la REM, car c'est la seule causalité physique [HAUTIER 96]. Cette propriété amène à définir des éléments d'accumulation d'énergie. Les relations de ces éléments sont dépendantes du temps et sont caractérisées par une relation intégrale entre la sortie et les entrées.

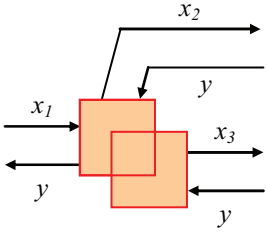
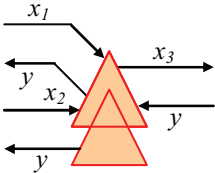
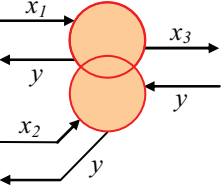
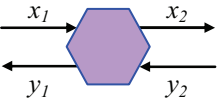
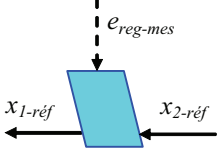
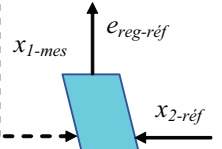
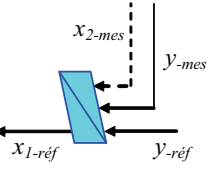
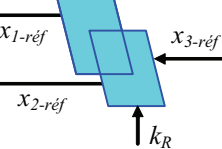
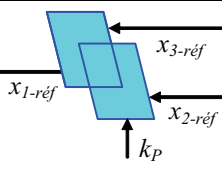
Par exemple, si on souhaite modéliser une inductance, que l'on suppose parfaite (Figure 45), on aura la relation causale suivante :

$$u_L(t) = u_2(t) - u_1(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \xrightarrow{\text{causalité intégrale}} i_L(t) = \int \frac{u_2(t) - u_1(t)}{L} dt \quad (86)$$

Le courant i_L réagit avec un certain temps de réponse par rapport aux sollicitations d'entrée.

Tableau 7. Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme REM [LHOMME 07]

REM (Représentation Énergétique Macroscopique)			
Élément	Symbole	Description	Exemples
Variable		variables d'action et de réaction	
Source		source d'énergie potentielle ou cinétique	alimentation électrique (continue, alternative), environnement d'un véhicule
Aiguilleur		aiguilleur de modèles (aiguillage d'énergie quelconque)	système physique pouvant faire varier le nombre de grandeurs d'états (exemple de l'embrayage)
Accumulateur		élément d'accumulation d'énergie (causalité intégrale) avec ou non des pertes dissipatifs	inductance, condensateur, inertie, masse
Convertisseurs		convertisseur électrique (sans accumulation d'énergie) avec ou non une entrée de réglage	transformateur électrique, convertisseur électrique
		convertisseur mécanique (sans accumulation d'énergie) avec ou non une entrée de réglage	réducteur, engrenage, roue glisse
		convertisseur électromécanique (sans accumulation d'énergie) avec ou non une entrée de réglage	conversion électromécanique d'une machine à courant continu à excitation séparée

Couplages		couplage électrique	couplage série (équi-courant), parallèle (équi-tension)
		couplage mécanique	poulie-courroie (équi-vitesse)
		couplage électromécanique	machine électrique
Estimateur		modèle ou estimateur (quelle que soit la forme)	
Inversions		inversion d'un élément de conversion avec e_{reg} comme entrée de perturbation (sans asservissement)	
		inversion d'un élément de conversion avec x_1 comme en- trée de perturbation (sans asservissement)	
Inversions		inversion d'un élément avec accumulation d'énergie (avec asservissement)	
		inversion d'un couplage aval (répartition des énergies)	
		inversion d'un couplage amont (pondération des énergies)	

		inversion d'un aiguilleur de modèles (aiguillage de l'énergie)	
Stratégie		détermine les critères de répartition k_R , les critères de pondération k_P , et les références	

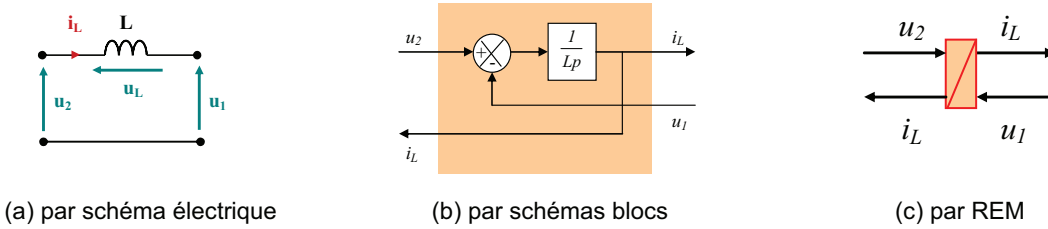


Figure 45. Représentation d'une inductance

Principe d'inversion

La structure de commande d'un système est obtenue par inversion du modèle du système [HAUTIER 96]. Pour cette méthode, les relations des éléments qui ne sont pas dépendantes du temps sont directement inversées (sans correcteur ni mesures). Par contre, étant donné que la causalité dérivée est interdite, l'inversion des relations des éléments qui dépendent du temps ne peut pas être directe et nécessite l'utilisation d'un correcteur et de mesures. On a donc les règles d'inversion suivantes (cf. Tableau 7) :

- les éléments de conversion sont directement inversés (parallélogrammes bleus)
- les éléments d'accumulation sont inversés en utilisant un correcteur et des mesures (parallélogrammes bleus barrés)
- l'inversion des éléments de couplage nécessitent une entrée supplémentaire de distribution ou de pondération (doubles parallélogrammes bleus).

Par exemple, l'inversion d'une inductance nécessite un correcteur C_{orr_L} , la mesure de la variable commandée, c'est-à-dire celle du courant i_{L_mes} et éventuellement la compensation de la tension u_{1_mes} qui agit comme une perturbation (Figure 46).

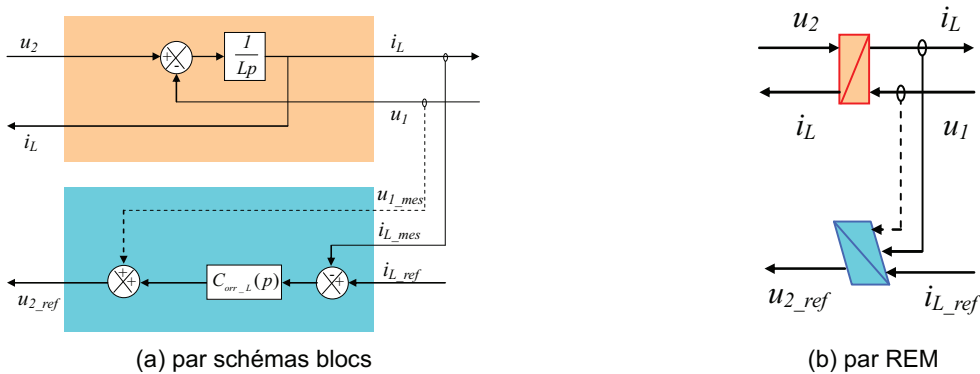


Figure 46. Représentation d'une inductance et sa commande

Annexe D : Modélisation des batteries Pb et Ni-MH du L2EP

Les batteries Pb et Ni-MH du L2EP ont été modélisées au cours d'un de mes séjours au LTE de Bron en utilisant les bancs de caractérisation et les outils de modélisation développés notamment pour des batteries Ni-MH et Lithium-ion [MONTARU 08].

Bancs de caractérisation du LTE

Des essais ont été réalisés sur les deux bancs de tests disponibles à l'INRETS-LTE pour une température de 20°C.

Le premier banc, le banc (20 V, 20 A), est composé d'un analyseur d'impédance, d'une alimentation et d'une charge électronique. Il permet d'effectuer des mesures d'impédance par spectroscopie et par chronopotentiométrie (jusqu'à 20 A) (Figure 47). La batterie initialement chargée est déchargée successivement de 20% puis rechargée successivement de 20%.

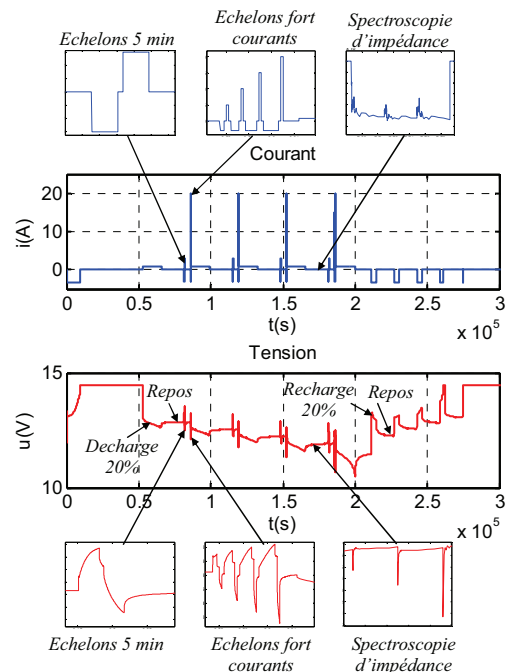
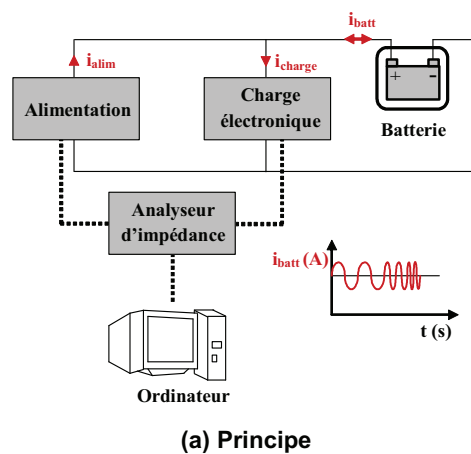
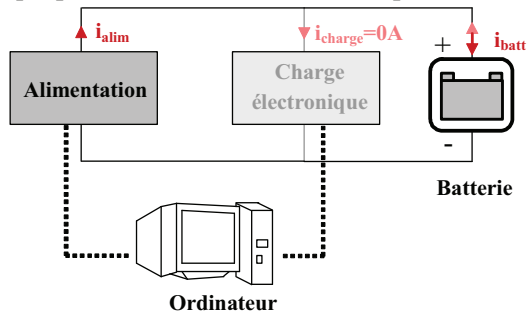


Figure 47 : Banc d'essai (20 V, 20 A)

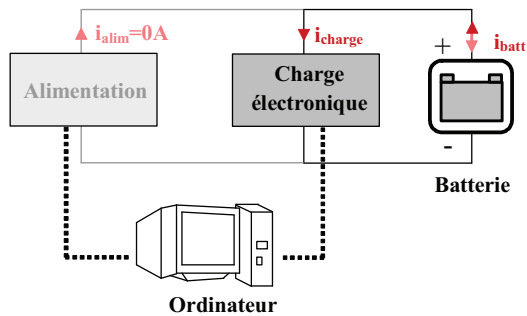
A chaque décharge ou recharge de 20%, la batterie est mise au repos jusqu'à ce qu'elle atteigne son état d'équilibre : la variation de la tension aux bornes de la batterie est nulle en fonction du temps. Plusieurs mesures d'impédance par spectroscopie sont réalisées sur une gamme de fréquence définie. Elles sont suivies de mesures d'impédance par chronopotentiométrie pour des échelons de courant longues durées, faibles amplitudes et des échelons de plus courtes durées, et de plus fortes amplitudes (Figure 47.c).

Le second banc, le banc (30 V, 200 A), est composé d'une alimentation et d'une charge électronique branchée en parallèle (Figure 48). Il ne permet pas de réaliser des mesures d'impédance par spectroscopie. En revanche, il permet d'effectuer des mesures d'impédance par chronopotentiométrie

pour des échelons forts courants (jusqu'à 200 A). La batterie est placée dans une enceinte thermique qui permet de maintenir la température constante.



(a) Recharge de la batterie



(b) Décharge de la batterie



(c) Batterie Ni-MH dans l'enceinte thermique

Figure 48 : Banc d'essai (30 V, 200 A)

Essais réalisés sur la batterie Pb

En charge complète (0-100% SOC): $Q_c = 16 \text{ Ah}$, $t_{ch} = 16 \text{ h}$

En décharge complète (100-0% SIC): $Q_d = 15,4 \text{ Ah}$, $t_{dech} = 18 \text{ h}$

$U_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$

$U_{batt_min} = 10,5 \text{ V}$ pour $0 < i_{batt} < 20 \text{ A}$,
 $= 9 \text{ V}$ pour $i_{batt} = 20 \text{ A}$
 $= 7,5 \text{ V}$ pour $i_{batt} > 20 \text{ A}$

❖ Notations

Q : quantité de charge

Q_{max} : quantité de charge maximale

Q_c : quantité de charge en charge

Q_d : quantité de charge en décharge

t_{ch} : temps de charge

t_{dech} : temps de décharge

t_{repos} : temps de repos

i_{batt} : courant batterie

i_{batt_max} : courant batterie maximal

u_{batt} : tension batterie

u_{batt_max} : tension batterie maximale

u_{batt_min} : tension batterie minimale

U_{alim} : tension maximale de l'alim

Banc (20 V, 20 A): Recharge totale : $i_{batt} = 3,4 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$, puis on maintient $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que $i_{batt} = 40 \text{ mA}$ (pendant environ 10h)

Pour les SOC=80, 60, 40, 20%

Banc (20 V, 20 A): Décharge de 20 % de SOC : $i_{batt} = 0,85 \text{ A}$ pendant $Q_{max} = 20\% 15,4 \text{ Ah} = 3,08 \text{ Ah}$,
 $t_{reposit} = 3h$

Banc (20 V, 20 A): Spectroscopie d'impédance : $i_{batt} = 200mA$, $100mHz < f < 2kHz$

Banc (20 V, 20 A): Echelons 5 min:

En recharge: $i_{batt} = 3A$, $t_{ch} = 300s$, $t_{reposit} = 60s$

En décharge : $i_{batt} = 3A$, $t_{dech} = 300s$, $t_{reposit} = 60s$

Banc (20 V, 20 A): Échelons moyens courants:

Echelon 1 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 13,8 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 5 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 10 \text{ s}$, $Q = 5 \times 10 / 3600 = 13,8 \text{ mAh}$.

Echelon 2 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 27,7 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 10 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 10 \text{ s}$, $Q = 10 \times 10 / 3600 = 27,7 \text{ mAh}$.

Echelon 3 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 41,7 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue à la décharge suivante.

En décharge : $i_{batt} = 15 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 10 \text{ s}$, $Q = 15 \times 10 / 3600 = 41,7 \text{ mAh}$.

Echelon 4 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 56 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue à la décharge suivante.

En décharge : $i_{batt} = 20 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 10 \text{ s}$, $Q = 20 \times 10 / 3600 = 56 \text{ mAh}$.

Banc (20 V, 20 A): Décharge complète : $i_{batt} = 0,85 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_min} = 10,5 \text{ V}$, $t_{reposit} = 4h$

Pour les SOC=20, 40, 60, 80%

Banc (20 V, 20 A): Recharge de 20% de SOC : $i_{batt} = 3,4 \text{ A}$ jusqu'à ce que $Q_{max} = 20\% 16 \text{ Ah} = 3,2 \text{ Ah}$, $t_{ch} = 4h$, $t_{reposit} = 8h$

Banc (20 V, 20 A): Spectroscopie d'impédance : $i_{batt} = 200mA$, $100mHz < f < 2kHz$

Banc (20 V, 20 A): Recharge totale : $i_{batt} = 3,4 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis on maintient $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que $i_{batt} = 40 \text{ mA}$ (pendant environ 10h)

❖ *Essai2*

Pour les SOC=80, 60, 40, 20%

Banc (20 V, 20 A): Décharge de 20% de SOC (réalisé sur le banc 20V, 20A) : $i_{batt} = 0,85 \text{ A}$ pendant $Q_{max} = 20\% 15,4 \text{ Ah} = 3,08 \text{ Ah}$, $t_{reposit} = 3h$

Banc (30 V, 200 A): Échelons forts courants (pour SOC=60%):

Echelon 1 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 83,3 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 10 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 30 \text{ s}$, $Q = 10 \times 30 / 3600 = 83,3 \text{ mAh}$.

Echelon 2 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 116,6 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 20 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 30 \text{ s}$, $Q = 20 \times 30 / 3600 = 116,6 \text{ mAh}$.

Echelon 3 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 333,3 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 40 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 30 \text{ s}$, $Q = 40 \times 30 / 3600 = 333,3 \text{ mAh}$.

Echelon 4 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 116,6 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 60 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 10 \text{ s}$, $Q = 60 \times 10 / 3600 = 116,6 \text{ mAh}$.

Echelon 5 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 44,4 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 80 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 2 \text{ s}$, $Q = 80 \times 2 / 3600 = 44,4 \text{ mAh}$.

Echelon 6 :

En recharge : $i_{batt} = 3 \text{ A}$ jusqu'à ce que $u_{batt} = u_{batt_max} = 14,46 \text{ V}$ puis $u_{batt} = u_{batt_max}$ jusqu'à ce que la quantité de charge $Q = 13,8 \text{ mAh}$ compense la quantité de charge perdue en décharge.

En décharge : $i_{batt} = 100 \text{ A}$ pendant $t_{dech} = 0,5 \text{ s}$, $Q = 80 \times 2 / 3600 = 13,8 \text{ mAh}$.

Essais réalisés sur la batterie Ni-MH

En charge complète (0 -96 % SOC) : $Q_c = 8,4 \text{ Ah}$

En décharge complète (96-0 % SOC) : $Q_d = 8,04 \text{ Ah}$

Après une décharge partielle : $t_{repos} = 3 \text{ h}$

Après une charge partielle : $t_{repos} = 6 \text{ h}$

$U_{batt_max} = 30 \text{ V}$

$U_{batt_min} = 17,5 \text{ V}$

❖ Essai 1

La spectroscopie d'impédance a été réalisée sur la moitié des éléments de la batterie, soit 10 éléments.

Banc (30 V, 200 A): décharge totale et repos : $i_{batt} = 10 \text{ A}$, $U_{batt_min} = 17,5 \text{ V}$, $t_{dech} = 1 \text{ h}$, $t_{repos} = 8 \text{ h}$

Banc (30 V, 200 A): Recharge rapide totale et repos : $i_{batt} = 3 \text{ A}$, $U_{batt_max} = U_{alim} = 30 \text{ V}$, $t_{ch} = 3,5 \text{ h}$, $t_{repos} = 8 \text{ h}$

Pour les SOC=80, 60, 40, 20%

Banc (30 V, 200 A): Décharge rapide 20% et repos : $i_{batt} = 10 \text{ A}$, $U_{batt_min} = 17,5 \text{ V}$, $t_{dech} = 10 \text{ min}$, $t_{repos} = 3 \text{ h}$ ($Q_c = 20 / 96 \cdot 8,04 = 1,675 \text{ Ah} \Rightarrow t_{dech} = 1,675 \cdot 10 / 60 = 10,05 \text{ min}$)

Banc (20 V, 20 A): Spectroscopie d'impédance : $i_{batt} = 200 \text{ mA}$, $10 \text{ mHz} < f < 10 \text{ kHz}$

❖ Essai 2

Banc (30 V, 200 A): Recharge rapide totale et repos : $i_{batt} = 3 \text{ A}$, $U_{batt_max} = U_{alim} = 30 \text{ V}$, $t_{ch} = 3,5 \text{ h}$, $t_{repos} = 6 \text{ h}$ avec une impulsion de courant de $i_{batt} = 2 \text{ A}$, $t_{ch} = 5 \text{ s}$ au bout de 3h de repos pour réactiver le BMS et mesurer la tension de la batterie

Banc (30 V, 200 A): Décharge rapide 16% et repos : $i_{batt} = 10A$, $U_{batt_min}=17,5 V$, $t_{dech}=8 min$, $t_{repos} = 3 h$

Pour les SOC=80, 60, 40, 20%

Banc (30 V, 200 A): Echelons 5 min:

Charge : $i_{batt} = 3A$, $U_{batt_max} = U_{alim}=30 V$, $t_{ch}=5 min$, $t_{repos} = 1min$

Décharge : $i_{batt} = 3A$, $U_{batt_min}=17,5 V$, $t_{dech}=5 min$, $t_{repos} = 1min$

Banc (30 V, 200 A): Echelons forts courants:

Charge : $i_{batt} = 18A$, $U_{batt_max} = U_{alim}=30 V$, $Q_{max} = 0,371 Ah$, pour compenser la quantité de charge perdue à la décharge suivante, $t_{repos} = 1min$

Décharge : $i_{batt} = 70A$, $U_{batt_min}=17,5 V$, $t_{ch}=0,5s$, $t_{repos} = 1min$, puis $i_{batt} = 60A$, $U_{batt_min}=17,5 V$, $t_{ch}=5s$, $t_{repos} = 1min$, puis $i_{batt} = 50A$, $U_{batt_min}=17,5 V$, $t_{ch}=20s$, $t_{repos} = 1min$

Banc (30 V, 200 A): Décharge rapide 20% et repos : $i_{batt} = 10A$, $U_{batt_min}=17,5 V$, $t_{dech}=10min$, $t_{repos} = 3h$ ($Q_c=20/96 8,04 = 1,675Ah \Rightarrow t_{dech}=1,675*10/60=10,05 min$)

Banc (30 V, 200 A): Décharge rapide totale et repos : $i_{batt} = 10A$, $U_{batt_min}=17,5 V$, $t_{dech}=1h$, $t_{repos} = 4h$ avec une impulsion de courant de $i_{batt} = 2A$, $t_{ch}=5 s$ au bout de 60s de repos pour réactiver le BMS et mesurer la tension de la batterie

Pour les SOC=20, 40, 60, 80 %

Banc (30 V, 200 A): Charge rapide 20% et repos : $i_{batt} = 3A$, $U_{batt_max} = U_{alim}=30 V$, $t_{ch}=33 min$, $t_{repos} = 6h$ avec une impulsion de courant de $i_{batt} = 2A$, $t_{ch}=5 s$ au bout de 3h de repos pour réactiver le BMS et mesurer la tension de la batterie

Banc (30 V, 200 A): Décharge rapide totale et repos

Banc (30 V, 200 A): Recharge rapide totale et repos

Modélisation et identification dans le domaine fréquentiel

❖ *Modèle initial*

Le modèle initial s'appuie sur le modèle de Randles (Figure 49). Il est constitué d'une source de tension parfaite qui représente la tension à vide de la batterie appelée généralement OCV (Open Circuit Voltage) associée à une impédance complexe $Z(j\omega)$. Cette impédance est composée de différents éléments connectés en série ($L+R_1+R_2//CPE_2+CPE_3$) :

- une inductance L . Elle prend compte le comportement inductif des connectiques
- une résistance R_1 . Elle représente les surtensions ohmiques au niveau des connectiques, des électrodes et de l'électrolyte.
- une résistance R_2 mise en parallèle avec une pseudo-capacité CPE_2 (Constant Phase Element). R_2 prend en compte les surtensions de transfert de charge et CPE_2 le phénomène de double couche électrochimique
- une pseudo-capacité CPE_3 . Elle représente le phénomène de diffusion.

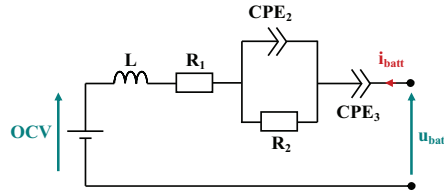


Figure 49 : Modèle initial

L'expression de l'impédance complexe de la batterie est la suivante:

$$Z(j\omega) = j\omega L + R1 + \frac{R_2}{1 + R_2 Q_2 (j\omega)^{\alpha_2}} + \frac{1}{Q_3 (j\omega)^{\alpha_3}} \text{ avec } CPE(j\omega) = \frac{1}{Q(j\omega)^\alpha} \quad (87)$$

Où Q et α ($0 < \alpha < 1$) sont les paramètres du CPE. Lorsque $\alpha=1$, le CPE se ramène à un condensateur ($CPE(j\omega)=1/(j\omega Q)$) de capacité Q et lorsque $\alpha=0$, le CPE se ramène à une simple résistance ($CPE=1/Q$).

❖ Identification du modèle initial

Pour chaque essai, à partir d'instant où le SOC de la batterie est connu (0 ou 100% de SOC), la variation du SOC en fonction du temps est recalculée en décharge et en charge (Figure 50, Figure 51).

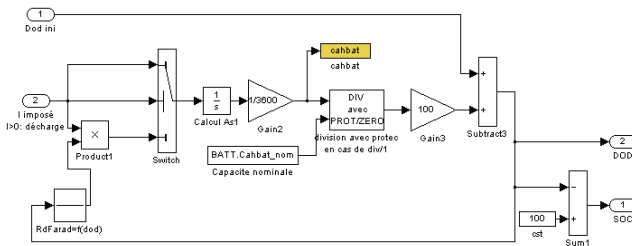


Figure 50 : Recalcul du SOC

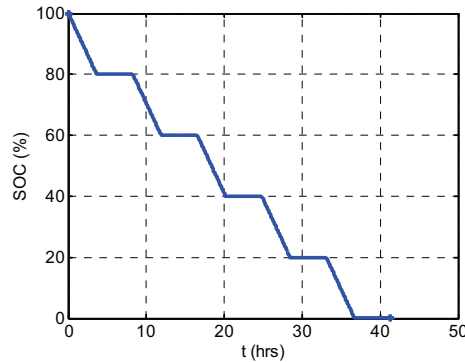


Figure 51 : SOC recalculée en décharge (batterie Pb)

A chaque décharge ou recharge de 20%, l'OCV de la batterie est mesurée quand le système a atteint son équilibre thermodynamique. Pour la batterie Pb : en recharge $t_{reposit_{ch}} = 8h$, en décharge $t_{reposit_{dech}} = 3h$. Pour la batterie Ni-MH, en recharge $t_{reposit_{ch}} = 6h$, en décharge $t_{reposit_{dech}} = 3h$. L'OCV est ensuite tracé en fonction du SOC en décharge et en charge. Il apparaît un phénomène d'hystérésis beaucoup plus important pour la batterie Ni-MH que pour la batterie Pb. Celui-ci n'a pas été modélisé, c'est la valeur moyenne de l'OCV en fonction du SOC après interpolation qui a été utilisée (Figure 52, Figure 53).

A partir des mesures d'impédance obtenues par spectroscopie d'impédance, des spectres d'impédance sont tracés dans le plan de Nyquist et permettent de visualiser l'évolution de l'impédance avec la fréquence (Figure 54). L'identification des éléments du modèle se fait sur un spectre moyen obtenu à partir des 3 spectres d'impédance réalisés pour différents SOC : 80, 60, 40, 20 %. Ce spectre moyen est corrigé de l'influence de la tension à vide afin de ne prendre en compte que l'impédance de la batterie.

Les 7 paramètres ($L, R_1, R_2, Q_2, \alpha_2, Q_3, \alpha_3$) du modèle sont optimisés par le critère des moindres carrés (88) de façon à ce que le spectre obtenu à partir du modèle se rapproche le plus possible de celui obtenu à partir des mesures (Figure 54, Figure 55).

$$\varepsilon(X) = \sum_{j=1}^N (\operatorname{Re}(Z_{mes}(f_j)) - \operatorname{Re}(Z_{sim}(f_j, X)))^2 + (\operatorname{Im}(Z_{mes}(f_j)) - \operatorname{Im}(Z_{sim}(f_j, X)))^2 \quad (88)$$

Où ε est le critère d'optimisation, X , les paramètres du modèle, Z_{mes} , l'impédance mesurée, Z_{sim} , l'impédance du modèle, f la fréquence du courant.

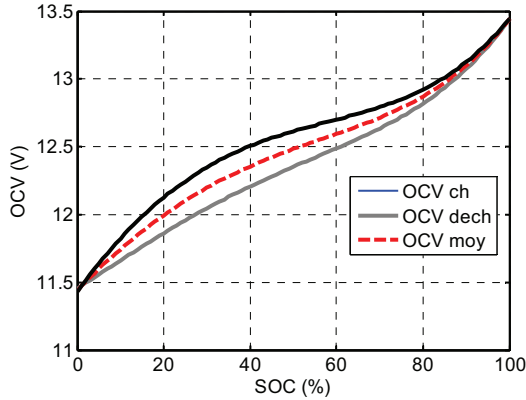


Figure 52 : OCV après interpolation (batterie Pb)

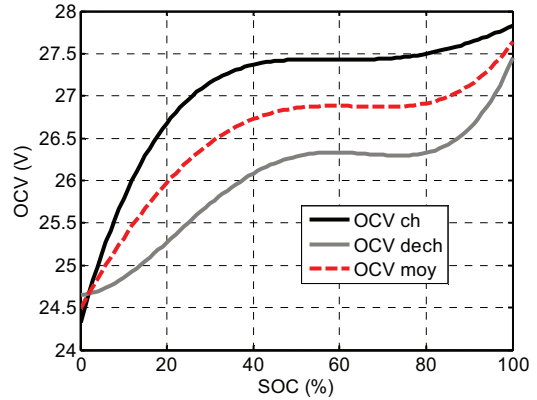


Figure 53 : OCV après interpolation (batterie Ni-MH)

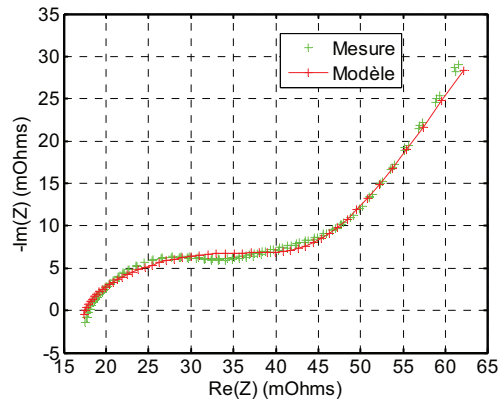


Figure 54 : Identification fréquentielle pour 60% de SOC (Batterie Pb)

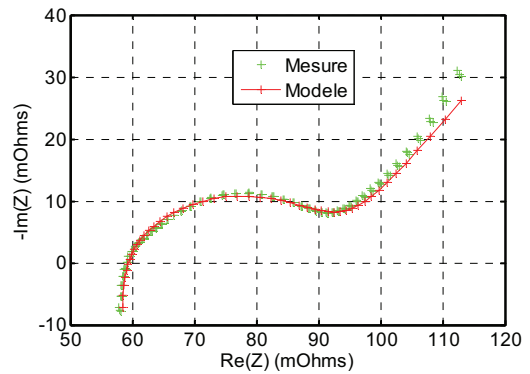


Figure 55 : Identification fréquentielle pour 60% de SOC (Batterie Ni-MH)

❖ *Modèle approximé*

Les paramètres de l'impédance de la batterie ont été estimés en fonction du SOC dans le domaine fréquentiel. Il faut préciser que l'objectif final de ce modèle est qu'il soit utilisable dans le domaine temporel pour pouvoir être inséré et utilisé lors de simulations temporelles. A partir du modèle identifié dans le domaine fréquentiel, il faut remonter jusqu'à l'évolution temporelle de la tension $u_{batt}(t)$. Classiquement, $u_{batt}(t)$ est obtenue à partir de la transformée de Laplace inverse de $U_{batt}(p) = Z(p)I_{batt}(p)$ (Figure 56).

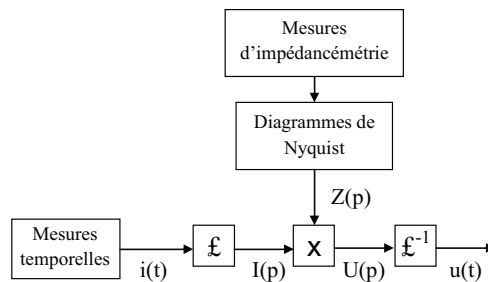


Figure 56 : Du domaine fréquentiel au domaine temporel

Dans notre modèle les impédances des *CPEs* qui sont des impédances d'ordre non entier posent problème. Une solution consiste à approximer l'impédance des *CPEs* par des fonctions de transfert du premier ordre. Dans le diagramme de Bode, un *CPE* est représenté par une droite de pente $-\alpha$ (89) (Figure 57). Cette droite peut être approximée par le produit de n fonctions de transfert du premier ordre (90).

$$\log|CPE(jw)| = -\log Q - \alpha \log(w) \tag{89}$$

$$CPE_{approx}(jw) = \gamma \frac{(1 + j \frac{w}{w_1})(1 + j \frac{w}{w_2}) \dots (1)}{(1 + j \frac{w}{w_1})(1 + j \frac{w}{w_2}) \dots (1 + j \frac{w}{w_n})} \tag{90}$$

Où w_k et w_k' avec $1 < k < n$ sont les pulsations caractéristiques.

Dans le diagramme de Bode, CPE_{approx} est représenté (Figure 57) :

- pour $w < w_1$ par une **droite horizontale**
- pour $w_1 < w < w_1'$ par une **droite de pente -1**
- pour $w_1' < w < w_2$ par une **droite horizontale**
- pour $w_2 < w < w_2'$ par une **droite de pente -1**
- pour $w_2' < w < w_3$ par une **droite horizontale**
- ...

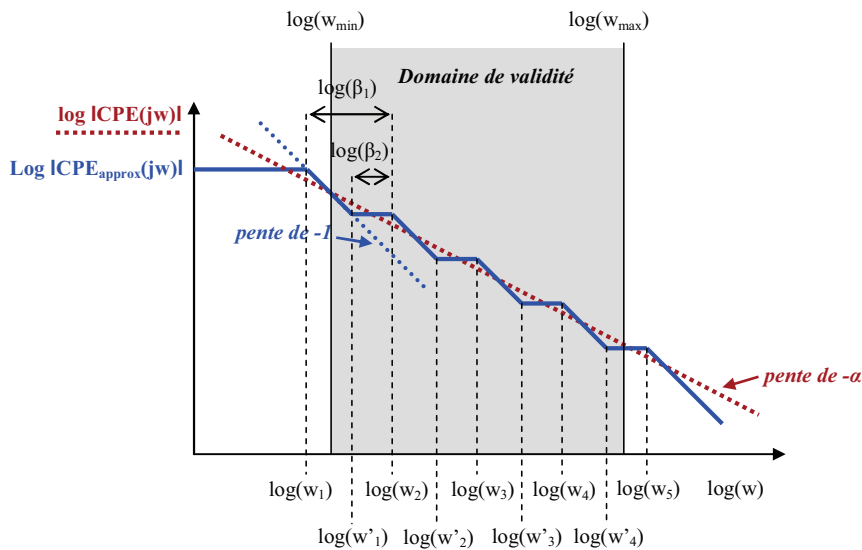


Figure 57 : Approximation du CPE par 5 fonctions de transfert du premier ordre [MONTARU 09]

Toujours dans la perspective d'implanter ce modèle dans des simulations temporelles, l'expression de CPE_{approx} est reformulée. Une solution consiste à décomposer l'expression de CPE_{approx} par une somme de fonction du premier ordre en utilisant la méthode de décomposition en éléments simples (91).

$$CPE_{approx}(jw) = \frac{A_1}{1 + j \frac{w}{w_1}} + \frac{A_2}{1 + j \frac{w}{w_2}} + \dots + \frac{A_n}{1 + j \frac{w}{w_n}} \tag{91}$$

La relation entre les paramètres A_k et les paramètres w_k, w_k' et γ est déterminé par calcul formel. Le CPE ainsi approximé peut être représenté par une succession de circuits $R//C$ mis en série dans le circuit électrique équivalent de la batterie.

Afin de simplifier le modèle, le CPE_2 a été remplacé par un simple condensateur C_2 . Pour les deux types de batteries, le CPE_3 a été approximé par 5 circuits $R//C$ mis en en série, ce qui semble être un bon compromis entre précision et temps de calcul (Figure 58). Le CPE_{3_approx} peut être défini à partir de 4 paramètres :

$$CPE_{3_approx} = f(f_{min}, f_{max}, a = -\alpha, \gamma) \text{ avec } f = \frac{w}{2\pi} \quad (92)$$

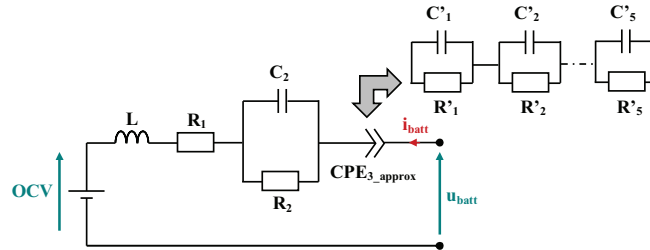


Figure 58 : Modèle approximé

❖ *Identification du modèle approximé*

Les valeurs des paramètres $L, R_1, R_2, C_2=Q_2$ en fonction du SOC sont récupérées de l'optimisation du modèle initial établi dans le domaine fréquentiel. Les paramètres f_1 et f_5 sont fixés ($f_1 = 10^{-4.141} \text{ Hz}$ et $f_5 = 1.389 \text{ Hz}$) de façon à ce que le modèle soit valide pour une décharge de 1C pendant 5 min. Une optimisation des paramètres γ et a (pente de l'approximation) est réalisée par le critère des moindres carrés(88) de façon à ce que le spectre obtenu à partir du modèle se rapproche le plus possible de celui obtenu à partir des mesures (Figure 59, Figure 60).

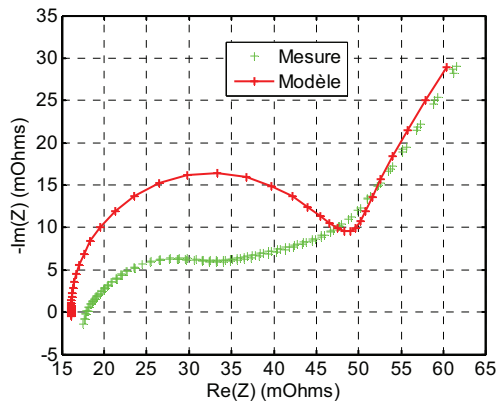


Figure 59 : Identification fréquentielle approximée pour 60% de SOC (Batterie Plomb)

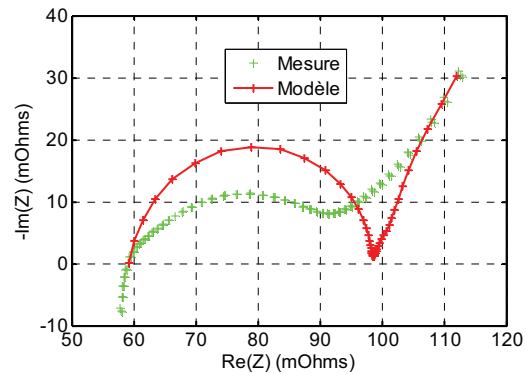


Figure 60 : Identification fréquentielle approximée pour 60% de SOC (Batterie Ni-MH)

Modélisation et identification dans le domaine temporel

❖ *Modèle*

Pour les deux types de batteries, l'inductance L n'est pas prise en compte pour le modèle dans le domaine temporel (Figure 61).

❖ Identification du modèle

L'identification peut s'effectuer sur différents types de profil de courant. Un modèle Simulink de la batterie est utilisé à la sortie duquel est visualisée la réponse en tension au profil de courant choisi (Figure 62).

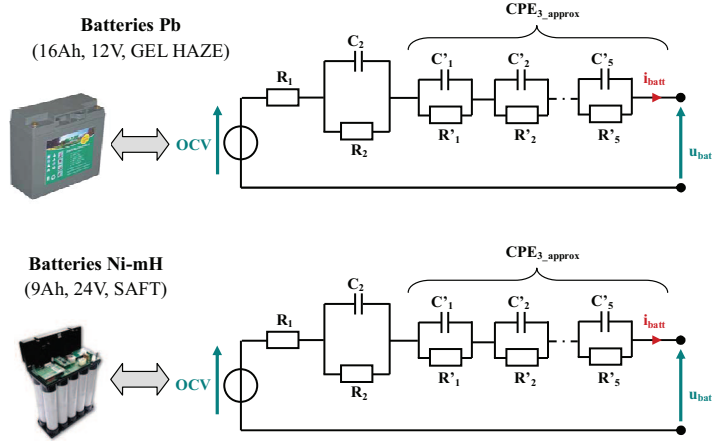


Figure 61 : Modèle dans le domaine temporel

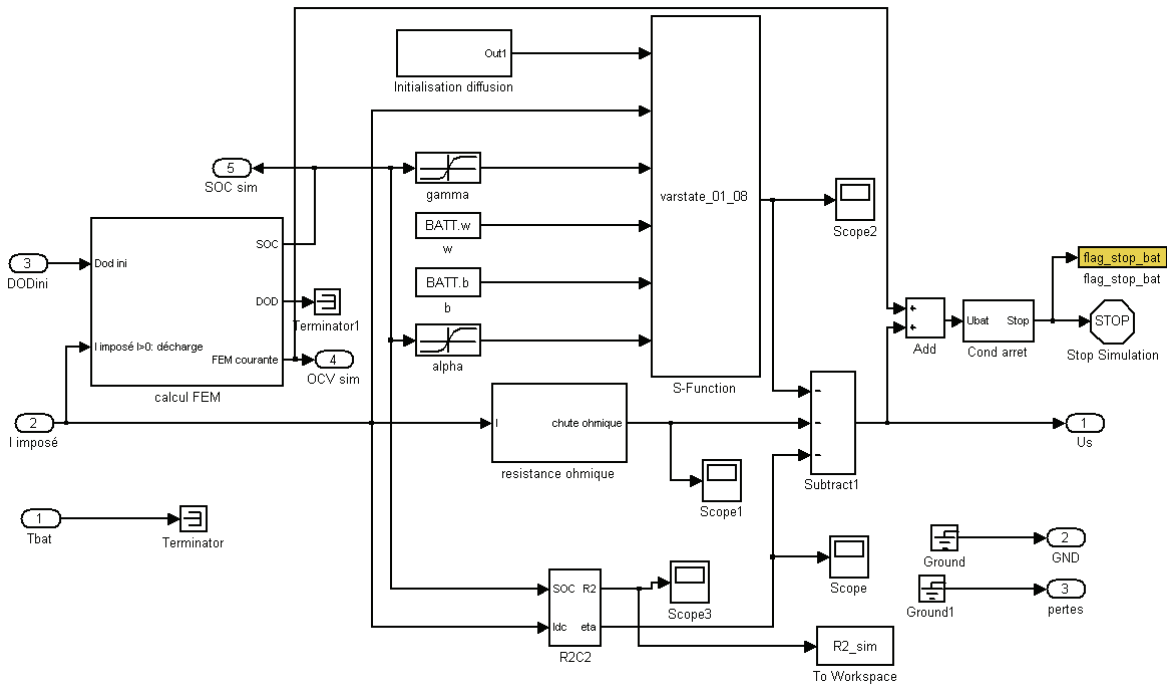


Figure 62 : Modèle de simulation dans le domaine temporel [VINOT 08]

Cette identification a mis en évidence une non linéarité de R_2 avec le courant. Pour la **batterie Plomb**, les valeurs des paramètres R_1 , C_2 , f_1 , f_5 et a en fonction du SOC sont récupérées de l'optimisation du modèle approximé identifié dans le domaine fréquentiel. Cette identification a mis en évidence une non linéarité de R_2 et de l'impédance de diffusion avec le courant et un comportement différent en charge et en décharge. Aussi, les paramètres γ et R_2 sont optimisés en charge et en décharge (γ_{ch} , γ_{dech} , $R_{2,ch}$, $R_{2,dech}$). L'identification est réalisée sur les échelons forts courant (Figure 63). En effet, l'identification sur cet essai permet de prendre en compte la non-linéarité des paramètres à optimiser avec le courant en les moyennant sur une gamme de courant donnée.

Pour la batterie **Ni-MH**, les valeurs des paramètres R_1 , f_1 , f_5 et a en fonction du SOC sont récupérées de l'optimisation du modèle approximé identifié dans le domaine fréquentiel.

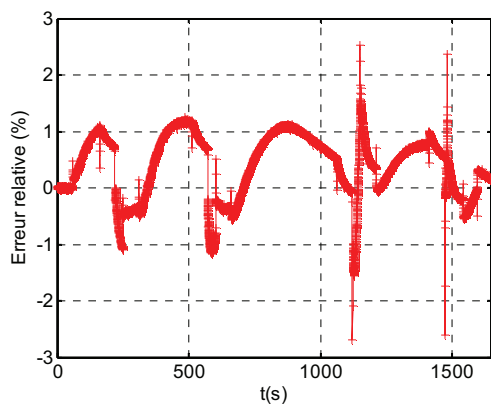
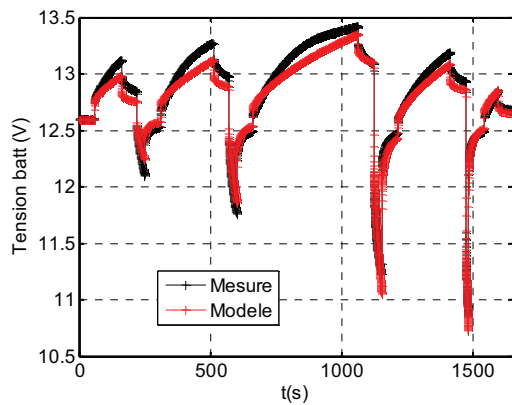
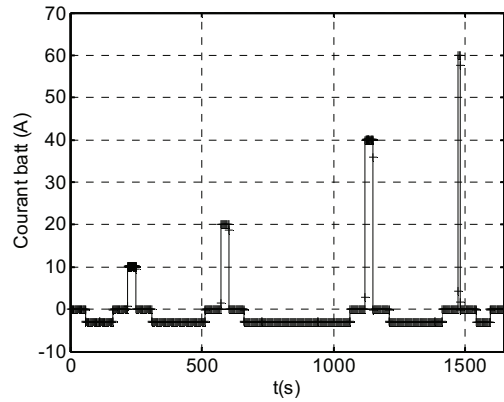


Figure 63. Identification temporelle pour 60% SOC (batterie Plomb)

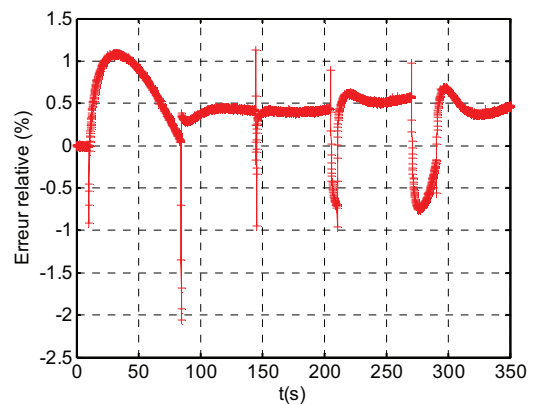
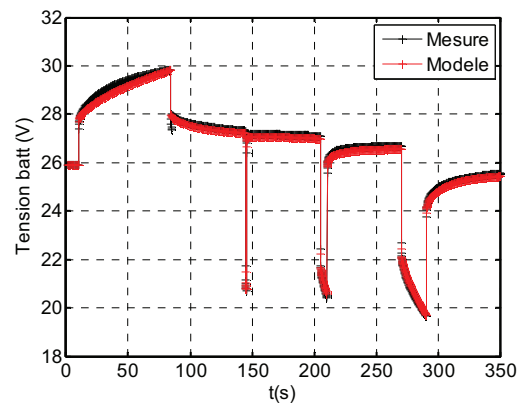
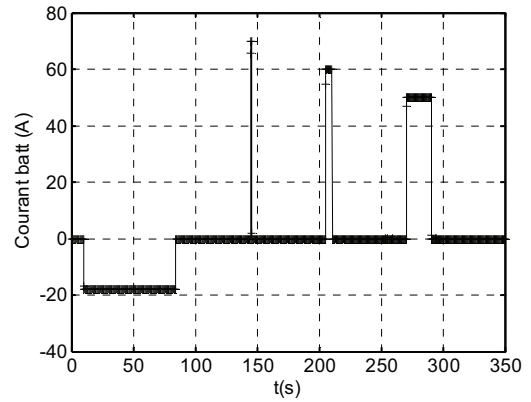


Figure 64. Identification temporelle pour 60% SOC (batterie Ni-MH)

Cette identification a mis en évidence une non linéarité de R_2 avec le courant. Aussi, le paramètre R_2 est optimisé en charge et en décharge (R_{2_ch} , R_{2_dech}). L'identification est réalisée sur les échelons forts courant (cf. Figure 64).

❖ Validation

Pour la batterie Pb, le modèle a été validé sur les « échelons 5 min » et les « échelons moyens courants » (Figure 65). Les erreurs relatives sont comprises entre -6 et 2%. Pour la batterie Ni-MH, le modèle a été validé sur les « échelons 5 min » (Figure 66). Les erreurs relatives sont comprises -1 et 2%.

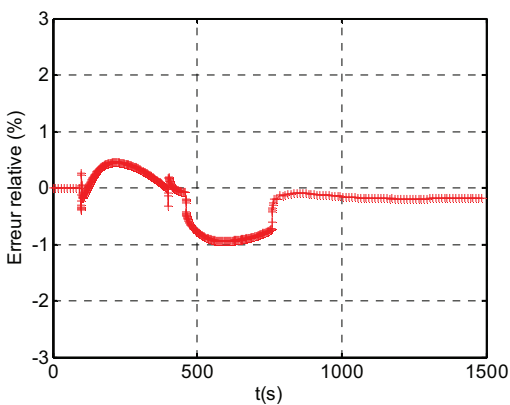
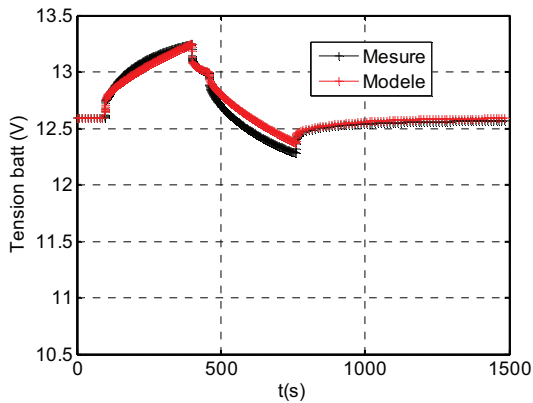
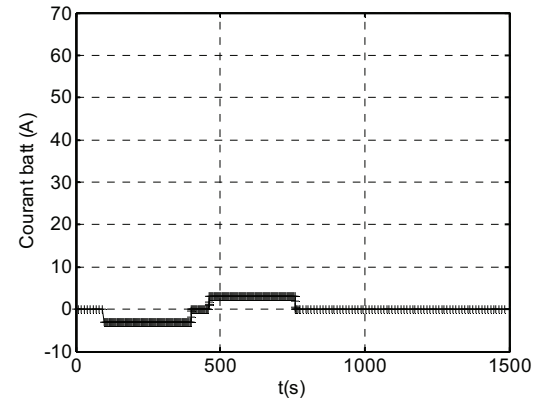


Figure 65. Validation temporelle sur les « échelons 5 min » pour 60% SOC (batterie Plomb)

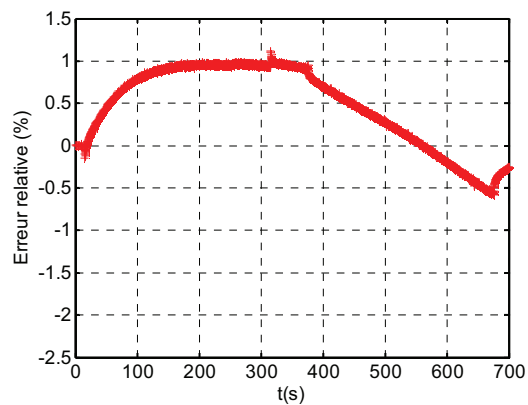
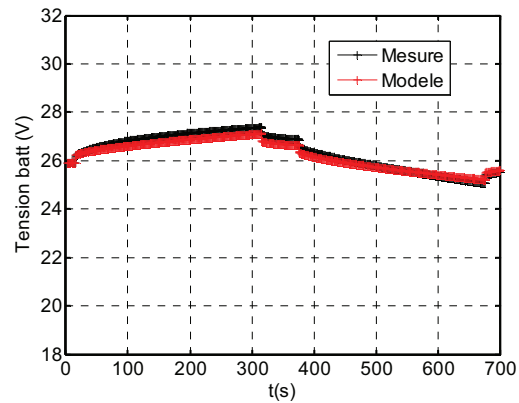
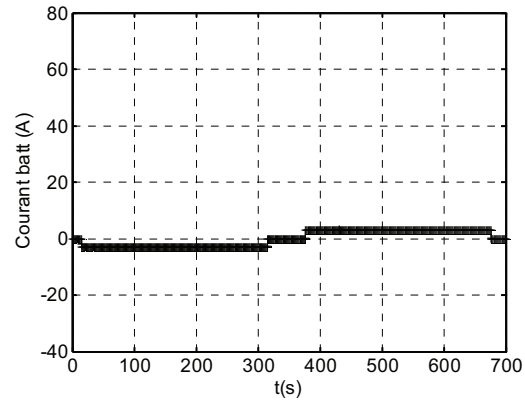


Figure 66. Validation temporelle sur les « échelons 5 min » pour 60% SOC (batterie Ni-MH)

Pour la batterie Pb, le modèle a également été validé pour un SOC de 60% sur un cycle normalisé ECE représentatif de l'usage réel d'un véhicule (Figure 67).

Pour la batterie Pb, différents modèles de batteries Pb ont été comparés sur un même profil de courant afin de voir l'influence des différents phénomènes ayant lieu au sein de la batterie (Figure 68, Figure 69). A partir du modèle 3 de la Figure 68, modèle qui a été développé et validé, des simplifications ont été réalisées. Ainsi, le modèle 2 ne prend pas en compte le phénomène de diffusion et le modèle 1 ne prend pas en compte ni le phénomène de transfert de charge, ni ceux de polarisation et de diffusion. Pour chacun des modèles, les paramètres ont été optimisés pour le modèle 3 et ce sont les mêmes paramètres qui sont utilisés dans les modèles simplifiés. Comme, on pouvait s'y attendre, les résultats sont moins bons pour les modèles simplifiés et les erreurs relatives plus importantes. Ainsi, si on utilise le modèle 1, on aura une erreur relative environ 1,8 fois plus importante que si on utilise

le modèle 3. Pour le modèle 2, on aura une on aura une erreur relative environ 1,5 fois plus importante que si on utilise le modèle 3. Il est important de noter que ces erreurs relatives peuvent être amplifiées suivant le profil de courant considéré. Par cette thèse, pour se rapprocher le plus possible du comportement réel de la batterie, nous avons utilisé le modèle 3.

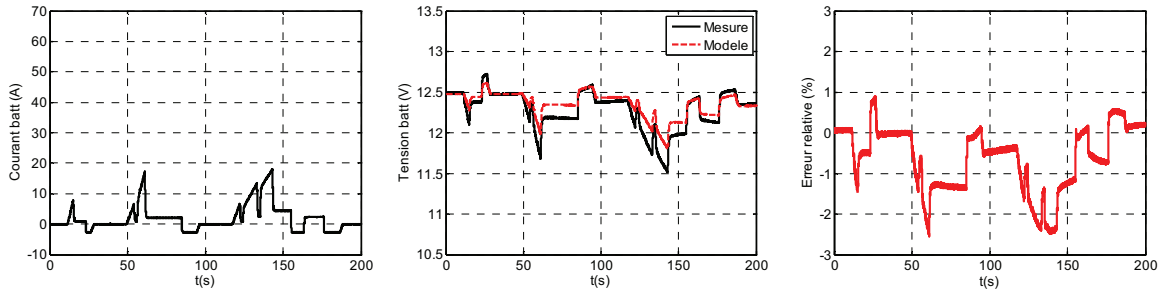


Figure 67. Validation expérimentale sur cycle ECE (batterie Pb)

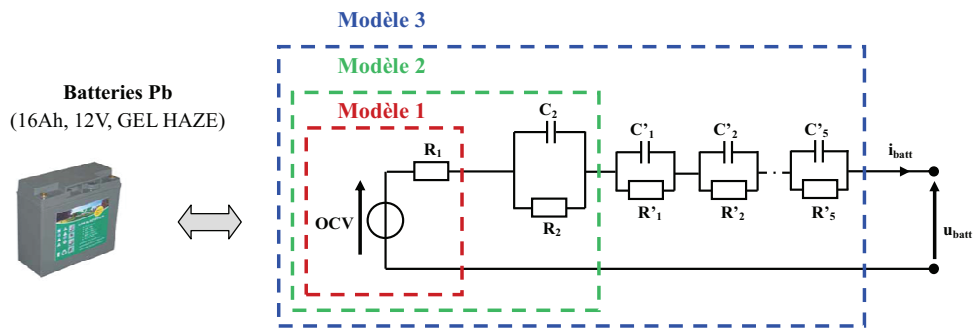


Figure 68. Différents modèles de batteries (batterie Plomb)

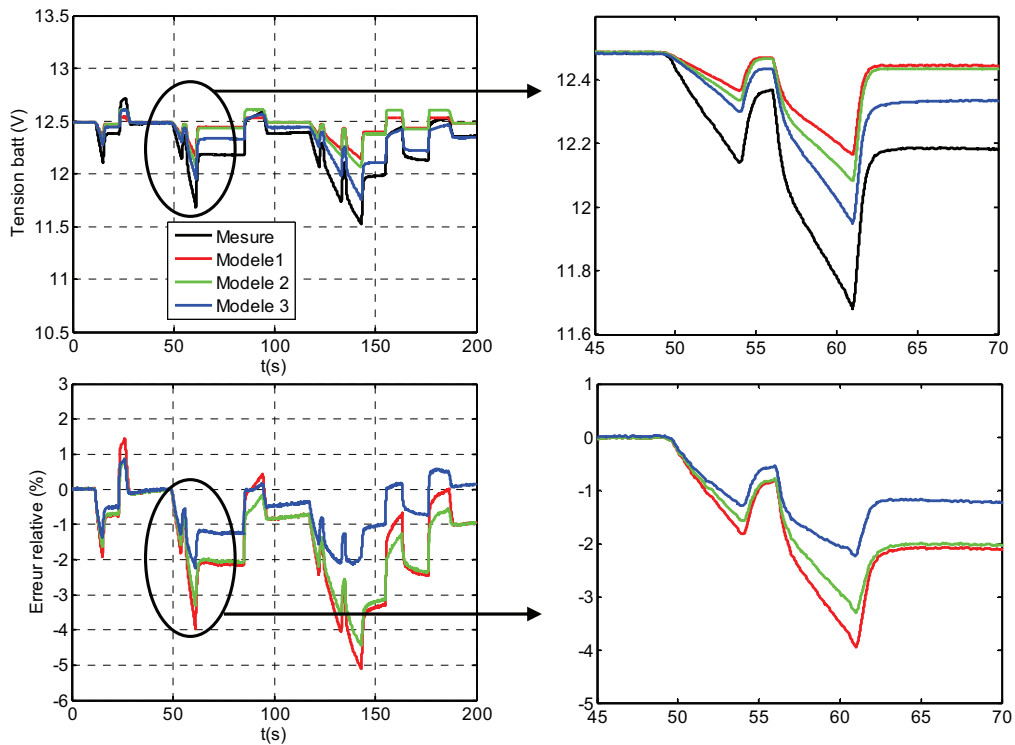


Figure 69. Comparaison de différents modèles de batteries (batterie Plomb)

Annexe E : Caractéristiques des bancs de supercondensateurs du L2EP

Trois bancs de supercondensateurs sont disponibles au L2EP. Le premier banc a été réalisé en 2005 pour valider notamment les travaux de M. Walter Lhomme sur le VHE série avec supercondensateurs (Figure 70) [LHOMME 07]. Il se compose de 12 modules 58 F/ 15V BPAK0350-15EA de chez Maxwell. Chaque module est constitué de 6 supercondensateurs 350F /2,5V BCAP0350 E270 T11 mis en série (Figure 71, Figure 72).

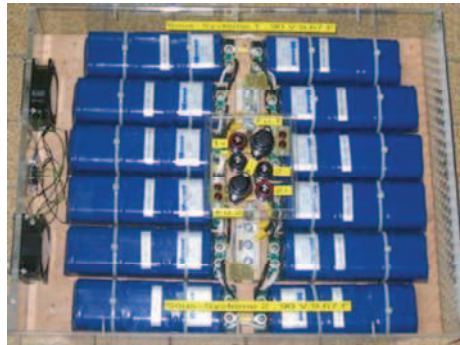


Figure 70. Banc de supercondensateurs Maxwell du L2EP

Les deuxièmes et troisièmes bancs de supercondensateurs ont été réalisés en 2009 dans le cadre d'un contrat de collaboration entre Siemens Transportation System (STS) et le L2EP [BOUS-CAYROL 09]. Chaque banc se compose d'un module Batscap 130 F/ 54V M2-54V130F de chez Batscap. Chaque module est constitué de 20 supercondensateurs de 2600F / 2,5V (Figure 73).

DATASHEET
BC ENERGY SERIES RADIAL D CELL 350F ULTRACAPACITOR

BCAP0350 E270 T11

FEATURES AND BENEFITS

- Round, radial mounting design for easy surface mount assembly
- Over 500,000 duty cycles
- 10 year life capability
- Ultra-low internal resistance

APPLICATIONS

- Industrial power back up
- Portable power tools
- Renewable energy systems
- Short term UPS (uninterruptible power supply) and telecom applications

PRODUCT SPECIFICATIONS

CAPACITANCE	
Nominal capacitance	350 F
Capacitance tolerance	+20% / -0%
VOLTAGE	
Rated voltage	2.7 V DC
Surge voltage	2.85 V DC
Maximum operating voltage	2.7 V DC
Isolation voltage	N/A
RESISTANCE	
ESR, DC	3.2mΩ
Resistance tolerance	Max.
Thermal resistance (Rth)	10.9C/W
TEMPERATURE	
Operating temperature range	-40°C to +65°C
Storage temperature range	-40°C to +70°C
TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
Capacitance change % at 25°C	± 5%
Internal resistance % at 25°C	± 150%
POWER	
Pd	4,300 W/kg
ENERGY	
E _{max}	5.62 Wh/kg
LIFESPAN	
Endurance After 1,000 hours application of rated voltage at 65°C.	
Capacitance change	<20% decrease
Internal resistance	<25% increase
Life test At rated voltage and 25°C.	10 years
Capacitance change	≤20% decrease
Internal resistance	≤100% increase
CYCLES	
Cycles - Capacitors cycles between specified voltage and half rated voltage under constant current at 25°C (500,000 cycles)	

Capacitance change	20% decrease
Internal resistance	100% increase
CURRENT	
Leakage current After 72 hours at 25°C. Initial leakage current can be higher.	0.3 mA
Short circuit current (I _{sc}) CAUTION: Current possible with short circuit from U ₀ . Do not use as an operating current.	840 A
Maximum continuous current	25 A
Maximum peak current, 1 sec	220 A
CONNECTION	
Terminal	Radial
SIZE	
Dimensions	See drawing
Volume	0.053 L
Mass	63g

MOUNTING RECOMMENDATIONS

Solder tabs to PCB. See application note for further information and slot spacing recommendations.

MARKINGS

Parts are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION

Capacitance and ESR, DC measured per document no. 1007239, available at www.maxwell.com.

I_c = leakage current after 72 hours at 25°C

$$I_{sc} \text{ (short circuit current)} = \frac{V_{RATED}}{ESR}$$

R_{th} = thermal resistance

$$E_{max} = \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3,600 \times mass}$$

$$P_{max} = \frac{V^2}{4R \text{ (1kHz)} \times mass}$$

$$P_d = \frac{0.12V^2}{R(DC) \times mass}$$

Figure 71. Documentation technique des supercondensateurs Maxwell 350F /2,5V BCAP0350 E270 T11 (www.maxwell.com)



Lug Connection

Series: BPAK



Features:

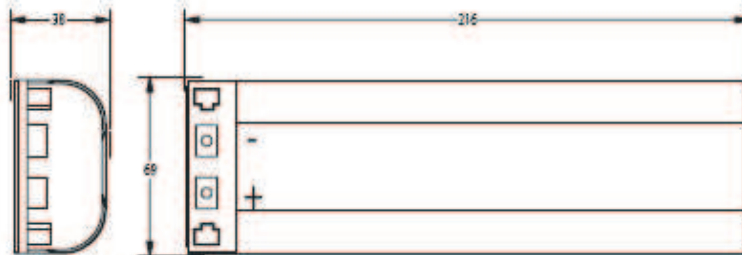
- > 15 V working voltage
- > Individually balanced cells
- > Compact, efficient packaging
- > Strap mountable
- > Module-to-module balance cable included



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	103956	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.

	Product Specification			
	BPAK0350-15EA	BPAK0350-15ER	Tolerance	Standard
Mounting	Screw to chassis surface			
Capacitance, C_R [F]	58		+/- 20%	
Voltage, U_R	15			
Internal resistance, DC [ohm]	0.019		+/- 25%	Discharging at Constant Current (25°C)
Internal resistance, 1 kHz [ohm]	0.01		+/- 25%	
Thermal Resistance, R_{th} [°C/W]	1.84			$\Delta T = DR_{th} I^2 R_d$
Short circuit current, I_{sc} [A]	1500			Caution, current possible with short circuit from U_R
Leakage current [mA]	1	50		72 hrs, 25°C
Operating temp. range [C]	-40 to 65			
Storage temp. range [C]	-40 to 70			
Endurance, Capacitance [F]	< 20% decrease			1000 hrs @ U_R and 65°C
Endurance, Resistance [ohm]	< 25% increase			
Maximum energy, E_{max} [Wh/kg]	3.63			Full discharge from U_R
Peak Power Density [W/kg]	11,250			Matched load
Power, P_d [W/kg]	2,850			See additional technical information
Life Time	$\Delta C/C_R < 20\%$ decrease, ESR < 2 x increase from initial value after 10y @ 25°C			
Cycle Life Time	$\Delta C/C_R < 20\%$ decrease, ESR < 2 x increase from initial value after 500K cycles @ 25°C (I = 5A)			

Figure 72. Données constructeurs des modules de supercondensateurs Maxwell 58 F/ 15V BPAK0350-15EA (www.maxwell.com)



Table 3-1 – Module specifications

Mechanical features	Standard version	Heatsink version
Width (mm)	334.5	334.5
Length (mm)	411	411
Height without terminals (mm)	115.5	122.5
Overall height (mm)	159.5	180.5
Volume (without terminals and connectors) (l)	15.9	16.8
Weight (kg)	15.5	18
Electrical features		
Nominal capacitance C (25 °C, 100 A)	130 F	130 F
C variation over temperature range	≤ 3%	≤ 3%
Nominal voltage	54 V	54 V
DC series resistance R_s^{DC} (25 °C, 100 A)	5 mΩ	5 mΩ
R_s^{DC} variation over temperature range	≤ 60%	≤ 60%
Time constant (25 °C, 100 A)	0.7 s	0.7 s
Typical effective current	150 A	150 A
Maximum peak current	600 A	600 A
Specific energy (2.7 Vpc, 25 °C)	3.40 Wh/kg	3.30 Wh/kg
Ragone power at 10 seconds, DOD 50%	850 W/kg	825 W/kg
Thermal features		
Operating temperature range	-35 to +65 °C	-35 to +65 °C
Storage temperature range	-35 to +70 °C	-35 to +70 °C
Safe maximum skin temperature of instrumented supercapacitor cells during cycling	70 °C	70 °C

Note: for details on characterization tests, refer to batScap Measuring Methods document.

Figure 73. Données constructeurs des modules de supercondensateurs
 Batscap 130 F/ 54V M2-54V130F (www.batscap.com)

Annexe F : Synthèse des correcteurs

L'inversion d'un élément d'accumulation indique qu'il faut un correcteur mais ne définit pas quel type de correcteur utiliser. Avant de réaliser la synthèse du correcteur, les schémas blocs utilisés à l'intérieur des blocs REM doivent être remaniés (Figure 74). On retrouve ainsi la configuration classique d'un système étudié en boucle fermée sous forme de schémas blocs (Figure 74.c).

Les correcteurs C_{orr} utilisés dans cette thèse sont des correcteurs simples, de type Proportionnel (P), Proportionnel Intégral (PI) et Intégral Proportionnel (IP). Nous allons développer ici la façon dont nous effectuons généralement la synthèse des correcteurs PI et IP.

Synthèse d'un correcteur PI

Plusieurs méthodes sont possibles pour synthétiser un correcteur PI. Il est préférable de réaliser une synthèse par placement de pôle plutôt qu'une synthèse par compensation de pôle, car celle-ci est peu robuste face aux variations possibles du système à commander.

Nous avons choisi de ne développer ici que la méthode de synthèse par placement de pôles.

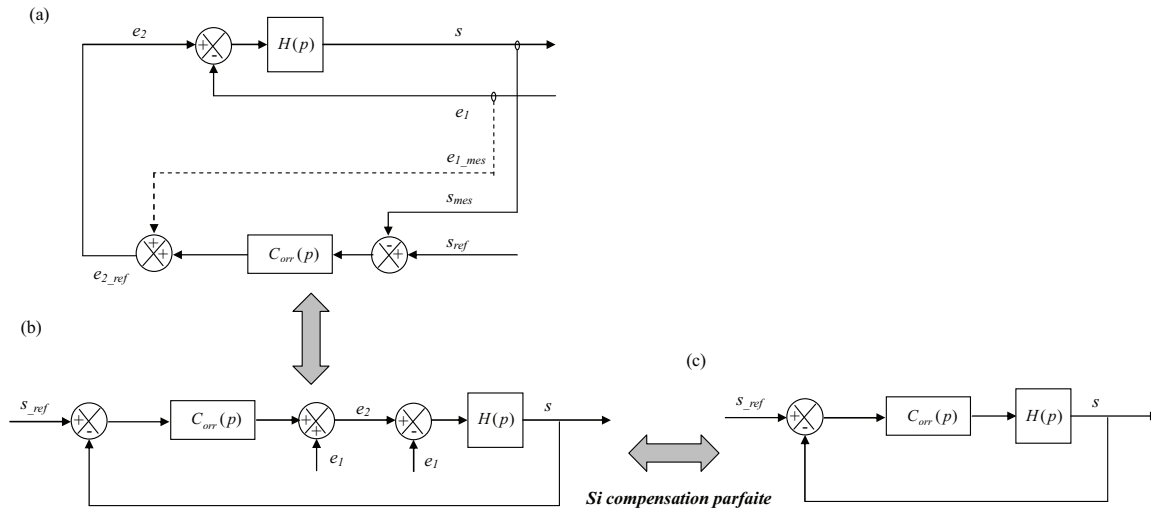


Figure 74. Remaniement des schémas bloc pour la synthèse des correcteurs

Nous supposons pour cette étude que l'élément à commander est modélisé par une fonction de transfert $H(p)$ du premier ordre :

$$H(p) = \frac{K}{1 + \tau p} \quad (93)$$

Avec K , le gain statique et τ la constante de temps du système en boucle ouverte.

La fonction de transfert du système en boucle fermée est calculée à partir de la fonction de transfert $H(p)$ et de la fonction de transfert du correcteur $C_{orr}(p)$:

$$H_{BF}(p) = \frac{C_{orr}(p)H(p)}{1 + C_{orr}(p)H(p)} \quad (94)$$

La fonction de transfert d'un correcteur PI a l'expression suivante :

$$C_{orr}(p) = K_p + \frac{K_i}{p} = \frac{K_p p + K_i}{p} \quad (95)$$

Après calculs, l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(p)$ a l'expression suivante :

$$H_{BF}(p) = \frac{(K_p p + K_i) \frac{K}{\tau}}{p^2 + \left(\frac{K_p K + 1}{\tau}\right)p + \frac{K_i K}{\tau}} \quad (96)$$

La forme canonique de la fonction de transfert d'un système du second ordre est la suivante :

$$F(p) = \frac{K}{p^2 + 2\xi w_n p + w_n^2} \quad (97)$$

Où K est le gain statique, ξ le coefficient d'amortissement et w_n , la pulsation propre du système.

Si on ne tient pas compte du zéro au numérateur de l'équation (97), par identification entre les équations (96) et (97), on obtient :

$$\begin{cases} K_p = \frac{2\xi w_n \tau - 1}{K} \\ K_i = w_n^2 \frac{\tau}{K} \end{cases} \quad (98)$$

Si la synthèse du correcteur est réalisée pour un dépassement nul, on a alors :

$$\begin{cases} D = 0\% \\ \xi = 1 \\ w_n t_r \equiv 5 \end{cases} \quad (99)$$

Où, D est le dépassement et t_r le temps de réponse en boucle fermée du système.

Ces valeurs proviennent d'abaques pour lesquelles le dépassement D et $w_n t_r$ sont donnés en fonction du coefficient d'amortissement ξ . Cependant, le zéro négligé dans la fonction de transfert en boucle fermée peut avoir une influence sur le dépassement et changer la valeur désirée.

Le temps de réponse en boucle fermée t_r peut être choisi plus rapide que le temps du système en boucle ouverte $t_{r_{BO}}$:

$$t_r \text{ choisi } \ll t_{r_{BO}} = 3\tau \quad (100)$$

Synthèse d'un correcteur IP

Comme précédemment, plusieurs méthodes sont possibles pour synthétiser un correcteur IP. Nous ne développerons ici que la méthode de synthèse par placement de pôles.

Nous supposons pour cette étude que l'élément à commander est modélisé par une fonction de transfert $H(p)$ du premier ordre (93). Les schémas blocs pour la synthèse d'un correcteur IP sont donnés Figure 75.

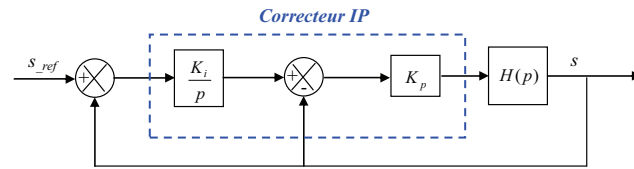


Figure 75. Schémas bloc pour la synthèse d'un correcteur IP

Après calculs, l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(p)$ a l'expression suivante :

$$H_{BF}(p) = \frac{\frac{K_i K_p K}{\tau}}{p^2 + \left(\frac{K_p K + 1}{\tau}\right)p + \frac{K_p K_i K}{\tau}} \quad (101)$$

Par identification entre les équations (97) et (101), on obtient :

$$\begin{cases} K_p = \frac{2\xi\omega_n\tau - 1}{K} \\ K_i = \frac{\omega_n^2\tau}{K_p K} \end{cases} \quad (102)$$

Comme précédemment, la synthèse du correcteur peut être réalisée pour un dépassement nul (99) et un temps de réponse en boucle fermé t_r est choisi plus rapide que le temps du système en boucle ouverte $t_{r_{BO}}$ (100).

Annexe G : Simulation « Hardware-In-The-Loop » (HIL) à échelle réduite pour la voiture électrique mixte

Principe

La simulation HIL consiste à insérer une partie du système réel dans une boucle de simulation. Généralement, la simulation HIL est réalisée à pleine échelle, puisque son objectif est d'insérer, par la suite, la partie du système testée dans le système complet [MACLAY 97], [BOUSCAYROL 08], [BOUSCAYROL 10].

Pour valider expérimentalement la SMC de la voiture électrique mixte étudié au chapitre 3 (cf. 3.1.2.6), le SSE électrique mixte est testé à échelle réduite et le système de traction est émulé. Différentes étapes sont proposées [ALLEGRE 10b]. Au départ, le véhicule "pleine échelle" est simulé avec sa commande (Figure 76). La seconde étape consiste à remplacer le SSE électrique mixte pleine échelle par un SSE électrique mixte à échelle réduite ; le système de traction pleine échelle n'est pas modifié. Une adaptation de puissance est alors nécessaire pour connecter la partie du système à échelle réduite à celle à pleine échelle (Figure 77). La troisième étape consiste à insérer un système d'interface dans la simulation entre le SSE électrique mixte à échelle réduite et le système de traction pleine échelle. Ce système d'interface doit reproduire le comportement du système de traction à échelle réduite. Il se compose d'un système d'émulation et sa commande (Figure 78). Finalement, les modèles de simulation à échelle réduite (SSE électrique mixte, système d'émulation) sont remplacés par leur système réel et les parties hardware insérées dans la boucle de simulation. La commande du système, l'adaptation de puissance et le modèle du système de traction, sont implantés en temps réel (Figure 79).

Adaptation de puissance

Un coefficient de courant k_i est défini afin de passer du courant i_{tract_BP} de la partie à échelle réduite (faible puissance) au courant i_{tract_HP} de la partie pleine échelle (haute puissance). De la même manière, un coefficient de tension k_u est défini pour passer de la tension u_{c_BP} à la tension u_{c_HP} .

$$\begin{cases} i_{tract_HP} = k_i i_{tract_BP} \\ u_{c_HP} = k_u u_{c_BP} \end{cases} \quad (103)$$

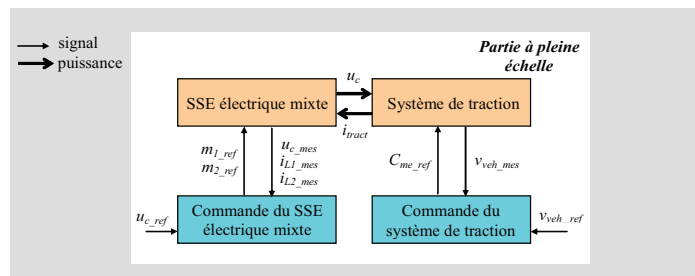


Figure 76. Simulation du système à échelle réelle

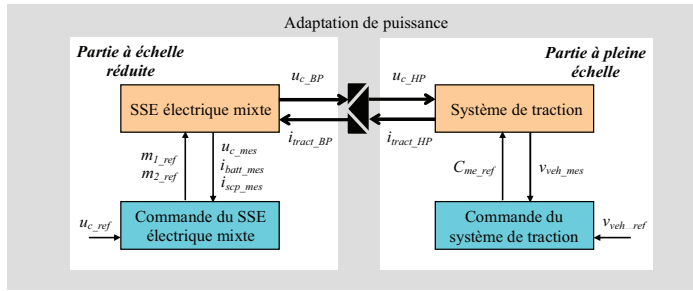


Figure 77. Simulation avec adaptation de puissance

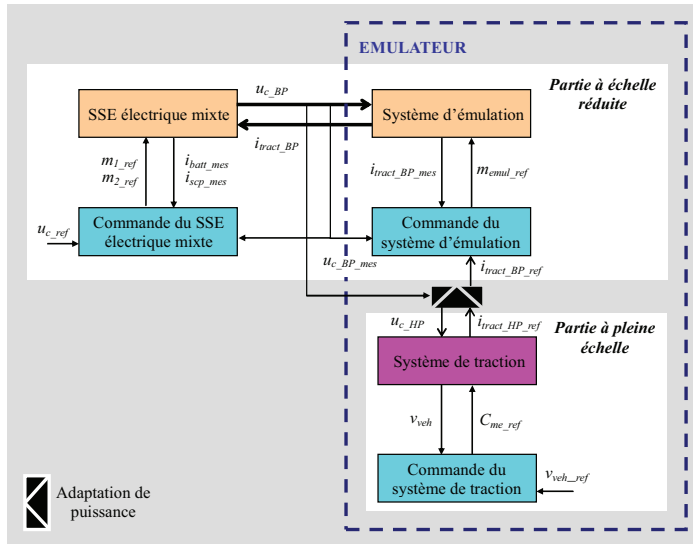


Figure 78. Simulation HIL à échelle réduite

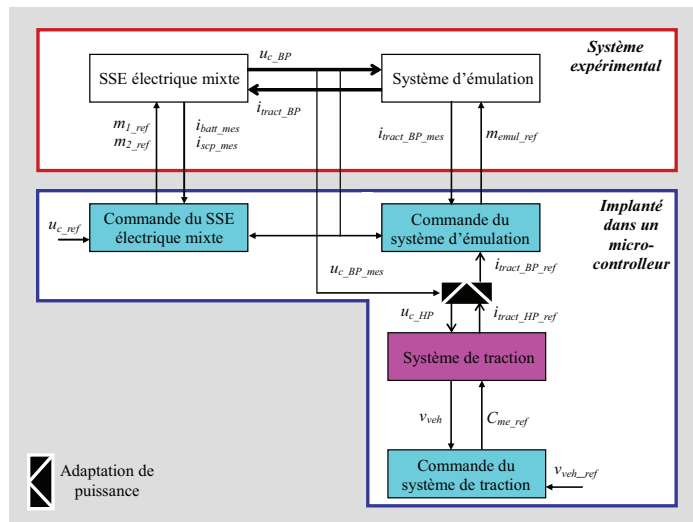


Figure 79. Implantation en temps réel de la simulation HIL à échelle réduite

Un coefficient de puissance k_p est obtenu à partir des relations d'adaptation de puissance (cf. (103)) :

$$k_p = \frac{P_{HP}}{P_{BP}} = \frac{i_{tract_HP} u_{c_HP}}{i_{tract_BP} u_{c_BP}} = k_i k_u \tag{104}$$

Pour le système étudié, le banc de batteries est constitué de 4 batteries Pb de 12V, soit un module de 48V et le banc de supercondensateurs de 20 supercondensateurs de 2600F / 2,5V, soit un module de

130F /50V. Le bus continu a été choisi tel que $u_{c_BP} = 150V$. Du coté pleine échelle, la tension de bus continu étant fixé à $u_{c_HP} = 250 V$, on obtient $k_u = 1,7$.

Les inductances du système expérimental supportent en continu un courant maximal de 20A. Le coefficient k_i est calculé de façon à ce que le courant circulant dans les inductances L_1 et L_2 ne dépasse pas 20A :

$$k_i = \frac{i_{tract_HP_max}}{i_{tract_BP_max} \min(m_{1_min}, m_{2_min})} \quad (105)$$

$$\text{Avec } \min(m_{1_min}, m_{2_min}) = m_{2_min} = \frac{u_{scp_min}}{u_{c_BP}} \text{ car } u_{batt_min} > u_{scp_min}$$

Avec les données du chapitre 3, § 3.1.2.6., on obtient $k_i = 23$ et $k_p \equiv 39$.

Emulation du système de traction

La REM et la SMC du système d'émulation complet sont données Figure 80. L'objectif du système d'émulation consiste à imposer au SSE électrique mixte, le courant de traction $i_{tract_BP_ref}$ obtenue, après adaptation de puissance, du système de traction pleine échelle. La tension de bus continu $u_{c_BP_mes}$ est mesurée et permet d'obtenir la tension u_{c_HP} après adaptation de puissance. Par le principe d'action-réaction, le système de traction pleine échelle fournit le courant $i_{tract_HP_ref}$.

La boucle de courant de la commande du système de traction doit être plus rapide que la boucle de vitesse de la commande du système de traction. De cette façon, le courant de traction en sortie du système d'émulation i_{tract_BP} sera bien l'image de celui produit par le système de traction $i_{tract_HP_ref}$.

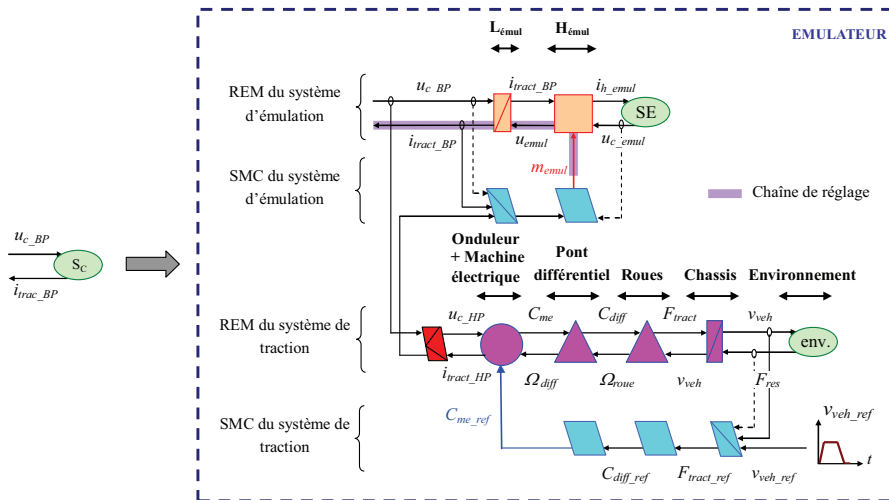


Figure 80. REM et SMC du système d'émulation du système de traction

Annexe H : Expérimentations réalisées pour le métro électrique mixte

La structure de commande du métro électrique mixte a été validée partiellement en expérimentation. Les expérimentations réalisées ne font pas appel aux quatre sources électriques disponibles dans le métro.

Metro en station

Une première expérimentation, utilisant deux bancs de supercondensateurs à échelle réduite, a permis de tester le transfert de puissance en station entre les supercondensateurs en station et les supercondensateurs embarqués [ALLEGRE 07].

Le schéma synoptique du système expérimental est donné Figure 81 et Figure 82. Le système ne dispose pas de hacheur connecté au système réseau. Les caractéristiques du système expérimental et les conditions d'expérimentation sont rassemblées dans le Tableau 8.

Dans une première phase, le système réseau recharge les supercondensateurs en station. Dans une deuxième phase, a lieu le transfert de puissance entre les supercondensateurs en station et les supercondensateurs embarqués. Contrairement à ce qui a été réalisé en simulation au § 4.2.3.6, les deux phases s'effectuent sans contrôle du bus continu.

Des résultats expérimentaux sont donnés Figure 83. On retrouve les deux phases décrites précédemment. La recharge des supercondensateurs en station s'effectue à courant constant ($i_{sc2} = 12A$) avec une annulation progressive du courant en fin de recharge pour annuler la chute de tension due à la résistance interne des supercondensateurs (Figure 83. A.a, b et B.a, b).

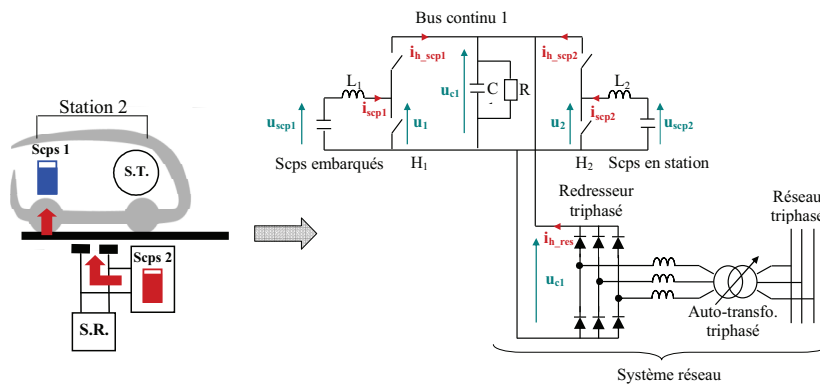


Figure 81. Synoptique du système expérimental du métro en station

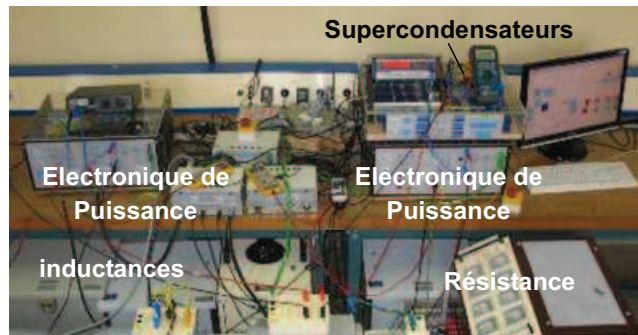


Figure 82. Système expérimental du métro en station

Tableau 8. Caractéristique du système expérimental et conditions expérimentales

Bus continu: $C = 2,2 \text{ mF}$, $u_{c1} = 125 \text{ V}$

Inductances: $L_1 = 70 \text{ mH}$, $r_{L1} = 303 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 100 \text{ mH}$, $r_{L2} = 432 \text{ m}\Omega$

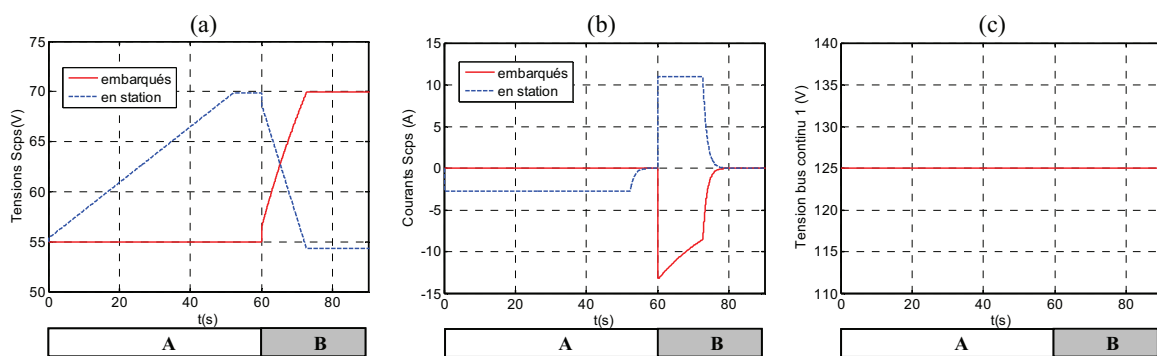
Scp embarqués et en station: Scp. Maxwell (350F, 2,5V)

$N_{p_scp1} = N_{p_scp2} = 1$, $N_{s_scp1} = N_{s_scp2} = 42$, $C_{scp1} = C_{scp2} = 9,7 \text{ F}$, $R_{scp1} = R_{scp2} = 114 \text{ m}\Omega$

$U_{scp1_min} = 55 \text{ V}$, $U_{scp2_min} = 50 \text{ V}$, $U_{scp1_max} = U_{scp2_max} = 70 \text{ V}$

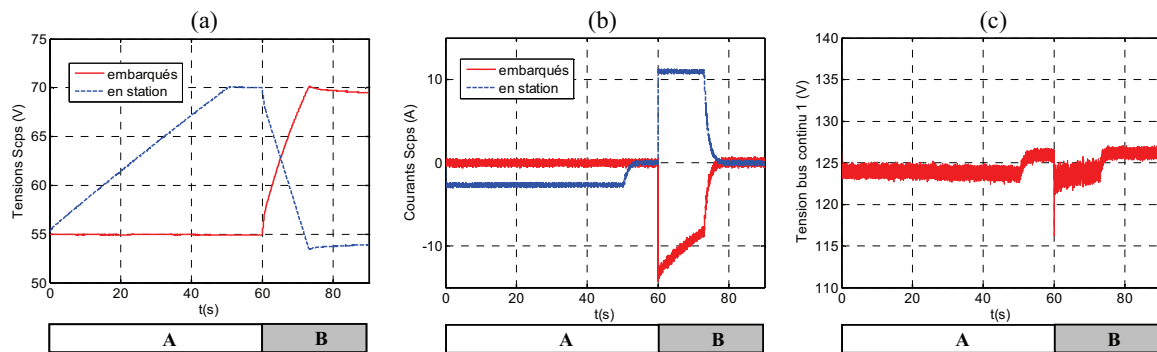
Période de modulation: $T_{mod} = 0.5 \text{ ms}$

Pas de calcul : $p_{calcul} = 0.05 \text{ ms}$



A : recharge des scps en station par le système réseau
B : Transfert d'énergie entre les scps en station et les scps embarqués

(A) Simulation



A : recharge des scps en station par le système réseau
B : Transfert d'énergie entre les scps en station et les scps embarqués

(B) Expérimentation

Figure 83. Résultats de simulation et expérimentaux du métro en station

Le transfert d'énergie entre les supercondensateurs en station et embarqués est également réalisé à courant constant avec une décroissance progressive du courant en fin de transfert. On peut remarquer qu'à la fin de la phase de transfert, en expérimentation, les supercondensateurs en station ont tendance à se recharger lentement et les supercondensateurs embarqués à se décharger lentement (Figure 83..B.a).

Ceci peut s'expliquer par le phénomène de relaxation qui n'a pas été considéré dans nos modèles de supercondensateurs. L'inductance L_2 étant plus grande que l'inductance L_1 , on peut observer que le

courant i_{scp2} est plus lissé que le courant i_{scp1} (Figure 83..B.b). De plus, la tension de bus continu que nous avons imposée constante en simulation varie en expérimentation car elle n'est pas contrôlée (Figure 83.A.c et B.c).

D'autres stratégies de transfert d'énergie ont été validées expérimentalement [ALLEGRE 07].

Méto entre deux stations

Une deuxième expérimentation, menée séparément de la première, a permis de tester la phase où le méto est entre deux stations au moyen d'une simulation **Hardware-in-the-loop (HIL)** à échelle réduite [ALLEGRE 10b, 10c]. Le système expérimental ne considère que le système embarqué (supercondensateurs embarqués et système de traction) et ne prend pas en compte le système en station (supercondensateurs en station et système réseau).

Le système supercondensateurs embarqués est testé à échelle réduite pour une première validation expérimentale ainsi qu'une partie du système de traction (onduleur et machine asynchrone), seule la partie mécanique du système de traction est émulée. Une adaptation de puissance est nécessaire pour connecter la partie du système à échelle réduite de celle à pleine échelle (Figure 84). Plus de détails sur la mise en œuvre de cette simulation HIL à échelle réduite sont donnés dans [ALLEGRE 10b].

Le schéma synoptique du système expérimental est donnée Figure 85 et Figure 86. Le système n'est pas exactement le même que celui présenté précédemment car on ne considère pas le système en station. Le système d'émulation et sa commande reproduisent le comportement de la partie mécanique à échelle réduite. Il reçoit en entrée un couple C_{me_BP} et doit fournir une vitesse de rotation Ω_{diff_BP} . Il est constitué d'une machine électrique (machine à courant continu), d'un hacheur H_{emul} , d'un bus continu de tension u_{c_emul} et d'une résistance R_{emul} (Figure 85). Les caractéristiques du système expérimental et les conditions d'expérimentation sont rassemblées dans le Tableau 9.. Pour des raisons de confidentialité, les coefficients d'adaptation entre la partie du système à échelle réduite et celle à pleine échelle ne seront pas donnés.

Etant donné que le rail d'alimentation n'est pas utilisé dans cette expérimentation, les supercondensateurs embarqués assurent à la fois le contrôle du bus continu et la gestion de la puissance de traction sur la totalité de l'interstation.

Des résultats expérimentaux sont donnés Figure 87. Le trajet testé est plat. La commande permet un bon asservissement de la vitesse du méto. Pendant les phases d'accélération et à vitesse constante, les supercondensateurs fournissent de la puissance au véhicule et se déchargent.

Pendant les phases de décélération, l'énergie renvoyée par le véhicule recharge partiellement les supercondensateurs embarqués tout en maintenant le bus continu à 250 V. Les limitations en couple, vitesse et puissance de la machine électrique équivalente ont été prises en compte dans la commande de la machine électrique équivalente à échelle réduite [ALLEGRE 10b]. Le bus continu est correctement contrôlé. On observe tout de même des pics de tensions lorsque le couple de la machine électrique entre en limitation.

D'autres trajets ont été testés en expérimentation avec des contraintes en couple et puissance plus importantes [ALLEGRE 10c]. En réalité le système expérimental dispose d'un hacheur supplémentaire avec une résistance. Ainsi, l'énergie de récupération pendant les phases de décélération par exemple peut être répartie entre les supercondensateurs et la résistance de dissipation [LHOMME 09]. Ceci est notamment nécessaire lorsque les supercondensateurs sont entièrement rechargés.

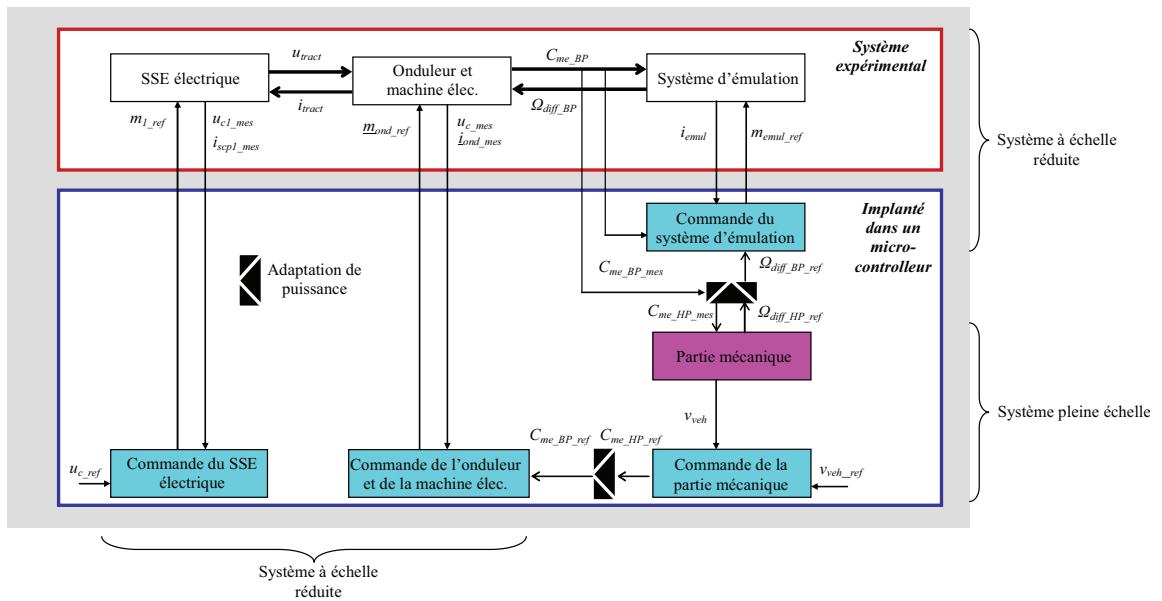


Figure 84. Implantation en temps réel de la simulation HIL à échelle réduite

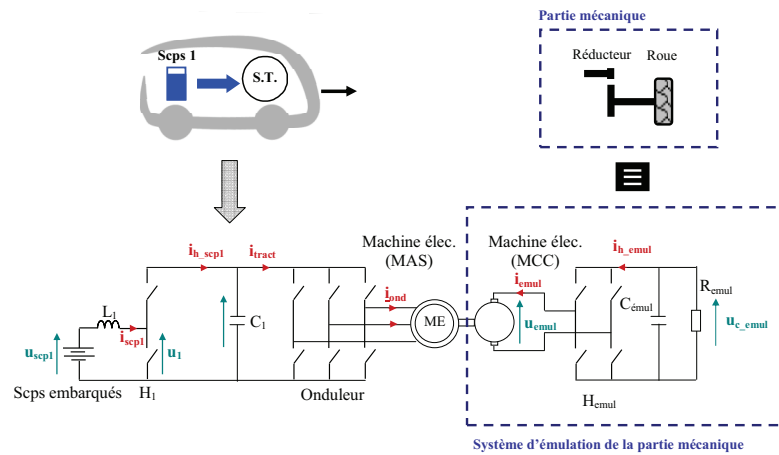


Figure 85. Synoptique du système expérimental du métro entre deux stations

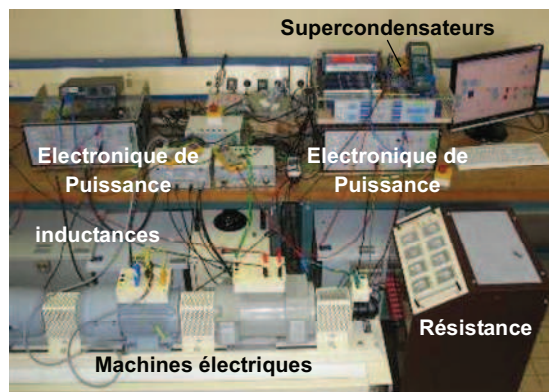


Figure 86. Système expérimental du métro entre deux stations

Tableau 9. Caractéristique du système expérimental et conditions expérimentales

SSE électrique (échelle réduite)	
Bus continu: $C_l = 2,2 \text{ mF}$, $u_{cl} = 250 \text{ V}$	
Inductances: $L_l = 213 \text{ mH}$, $r_{Ll} = 922 \text{ m}\Omega$	
Scps embarqués : Scps Maxwell (350F, 2,5V)	
$N_{p_scpl} = 1$, $N_{s_scpl} = 72$, $C_{scpl} = 4,83 \text{ F}$, $R_{scpl} = 228 \text{ m}\Omega$, $U_{scpl_min} = 100 \text{ V}$, $U_{scpl_max} = 140 \text{ V}$	
Système d'émulation (échelle réduite)	
Machine électrique : Machine asynchrone à rotor bobiné	
$P_{me_max} = 1,5 \text{ kW}$, $C_{me_max} = 10 \text{ Nm}$, $\Omega_{me_max} = 2000 \text{ tr/min}$	
Bus continu : $u_{emul} = 250 \text{ V}$	
Temps et fréquence mis en jeu	
Période de modulation: $T_{mod} = 0.55 \text{ ms}$	Pas de calcul : $p_{calcul} = 0.055 \text{ ms}$
Fréquence de modulation : $f_{mod} = 1,8 \text{ kHz}$	

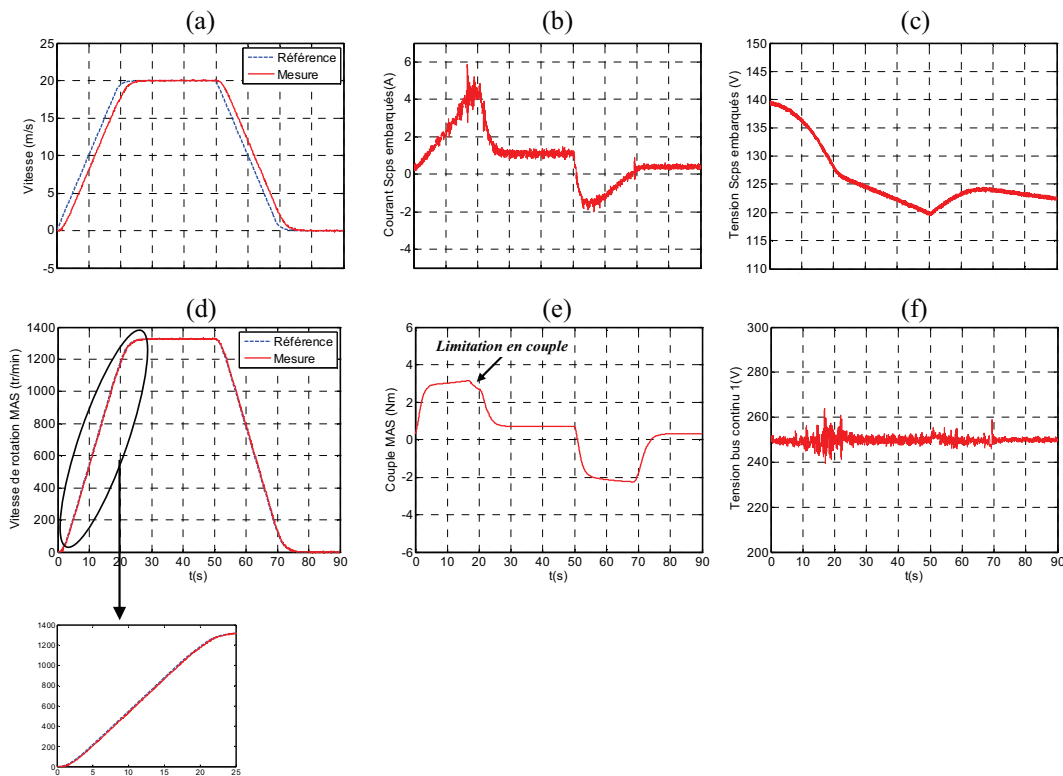


Figure 87. Résultats expérimentaux du métro entre deux stations

Extension

Une autre expérimentation utilisant des bancs de supercondensateurs plus conséquents a également été mise en place à partir des deux expérimentations présentées précédemment [BOUSCAYROL 09]. Cette expérimentation a permis de tester le transfert d'énergie entre deux bancs de supercondensateurs à une échelle plus importante [BOUSCAYROL 10] et a notamment permis de tester la phase où le métro accélère sur le rail d'alimentation. A ce moment là, les supercondensateurs en station fournissent la totalité de la puissance de traction et les supercondensateurs embarqués prennent le relais dès que le métro quitte le rail d'alimentation. Le banc expérimental ne nous permet pas pour le moment de faire participer le réseau.

Annexe I : Calcul du courant de référence pour la stratégie « fonction des résistances internes »

Méthode, hypothèses

Le véhicule étudié est la voiture électrique mixte (Figure 81). Pour la stratégie de gestion de l'énergie « fonction des résistances internes » développée au chapitre 4 (cf. § 4.3.2.2.), le courant de référence i_{hbatt_ref} est calculé de façon à minimiser les pertes dans le SSE électrique mixte.

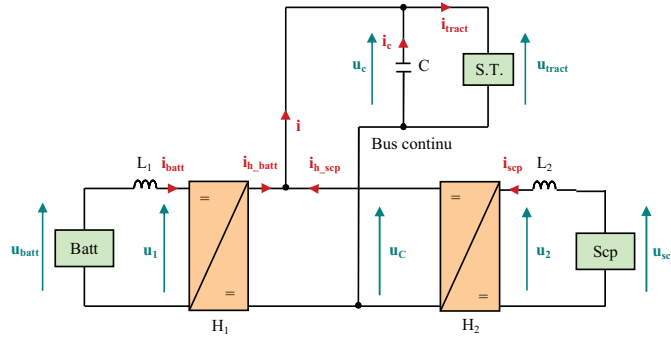


Figure 88. Architecture de la voiture électrique mixte étudiée

Ce calcul est effectué hors ligne et peut être divisé en différentes étapes. Premièrement, on va exprimer les pertes du SSE électrique mixte en fonction du courant i_{h_batt} et du courant i . Deuxièmement, on va dériver ces pertes par rapport à i_{h_batt} en supposant le courant i constant sur le pas de calcul considéré. Enfin on va résoudre l'équation donnant cette dérivée partielle égale à 0 (pertes min) pour obtenir l'expression du courant de référence $i_{h_batt_ref}$.

Pour ce calcul, on ne considère que les pertes dans les batteries, les supercondensateurs et les inductances. Les pertes des convertisseurs et bus continu ne sont pas considérées. De plus, pour simplifier les équations, les modèles du banc de batteries et du banc de supercondensateurs utilisés sont deux modèles simples, constitués de la mise en série d'une source de tension (U_{batt_0} pour le banc de batteries et U_{scp_0} pour le banc de supercondensateurs) et d'une résistance interne (R_{batt} pour le banc de batteries et R_{scp} pour le banc de supercondensateurs). Les tensions U_{batt_0} et U_{scp_0} sont supposées constantes sur le pas de calcul considéré.

Calcul du courant de référence $i_{h_batt_ref}$

L'expression des pertes dans le SSE électrique mixte P_{pertes_SSE} est la suivante :

$$P_{pertes_SSE} = (R_{batt} + r_{L1}) \left(\frac{i_{h_batt}}{m_1} \right)^2 + (R_{scp} + r_{L2}) \left(\frac{i_{h_scp}}{m_2} \right)^2 \quad (106)$$

Où r_{L1} et r_{L2} sont les résistances internes des inductances L_1 et L_2

Pour exprimer ces pertes en fonction des seuls courants i_{h_batt} et i , il suffit d'exprimer les fonctions de modulation m_1 et m_2 également en fonction de ces courants.

$$\begin{cases} m_1 = \frac{u_1}{u_c} \\ m_1 = \frac{u_2}{u_c} \end{cases} \quad (107)$$

Or en tenant compte des modèles simplifiés des bancs de supercondensateurs et de batteries, on a, en considérant le pas de calcul suffisamment faible pour négliger le transitoire entre deux points pour le courant i_{batt} et i_{scp} :

$$\begin{cases} u_1 = u_{batt} + u_{L1} = U_{batt_0} + R_{batt}i_{batt} + r_{L1}i_{batt} = U_{batt_0} + (R_{batt} + r_{L1})\frac{i_{h_batt}}{m_1} \\ u_2 = u_{scp} + u_{L1} = U_{scp_0} + R_{scp}i_{scp} + r_{L2}i_{scp} = U_{scp_0} + (R_{scp} + r_{L2})\frac{(i - i_{h_batt})}{m_2} \end{cases} \quad (108)$$

Ainsi à partir des équations (107) et (108), on obtient les deux équations du second degré suivantes :

$$\begin{cases} u_c m_1^2 - U_{batt_0} m_1 - (R_{batt} + r_{L1})i_{h_batt} = 0 \\ u_c m_2^2 - U_{scp_0} m_2 - (R_{scp} + r_{L2})(i - i_{h_batt}) = 0 \end{cases} \quad (109)$$

En ne considérant que les racines positives, la résolution de (109) donne les solutions suivantes :

$$\begin{cases} m_1 = \frac{U_{batt_0} + \sqrt{U_{batt_0}^2 + 4u_c(R_{batt} + r_{L1})i_{h_batt}}}{2u_c} \\ m_2 = \frac{U_{scp_0} + \sqrt{U_{scp_0}^2 + 4u_c(R_{scp} + r_{L2})(i - i_{h_batt})}}{2u_c} \end{cases} \quad (110)$$

Dans l'équation (106), En remplaçant m_1 et m_2 par les expressions obtenues en (110), on obtient l'expression des pertes en fonction des seuls courants i_{h_batt} et i :

$$\begin{aligned} P_{pertes_SSE} &= \frac{4(R_{batt} + r_{L1})i_{h_batt}^2 u_c^2}{U_{batt_0} + \sqrt{U_{batt_0}^2 + 4u_c(R_{batt} + r_{L1})i_{h_batt}}} \\ &+ \frac{4(R_{batt} + r_{L1})(i - i_{h_batt})^2 u_c^2}{U_{batt_0} + \sqrt{U_{batt_0}^2 + 4u_c(R_{batt} + r_{L1})(i - i_{h_batt})}} \end{aligned} \quad (111)$$

Ces pertes vont maintenant être dérivées par rapport au courant i_{h_batt} . Etant donné que l'on souhaite les minimiser, il suffit que cette dérivée partielle soit égale à 0 et d'en extraire le courant de référence $i_{h_batt_ref}$. Pour réaliser le calcul, on suppose que le courant i est constant sur le pas de calcul considéré :

$$\left. \frac{\partial P_{pertes_SSE}(i_{h_batt}, i)}{\partial i_{h_batt}} \right|_{i=cte} = 0 \Rightarrow \boxed{i_{h_batt_ref} = \frac{i(R_{scp} + R_{L2})U_{batt_0}^2}{(R_{batt} + R_{L1})U_{scp_0}^2 + (R_{scp} + R_{L2})U_{batt_0}^2}} \quad (112)$$

Annexe J : simulations du VE mixte pour différentes stratégies de gestion de l'énergie évoluées

Résultats de simulation sur 4 cycles urbains ECE

Les deux véhicules étudiés sont un VE avec batteries et un VE mixte avec batteries / supercondensateurs Figure 89.

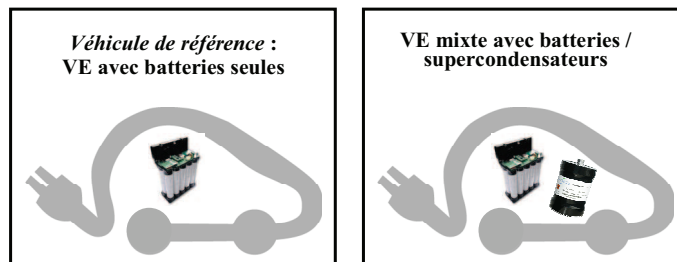


Figure 89. Véhicules étudiés

Ils sont comparés sur un trajet constitué de 4 cycles urbains ECE (Figure 90). La distribution de courant du banc de batteries pour les différentes stratégies est donnée Figure 91 et le positionnement des stratégies les unes par rapport aux autres Figure 92.

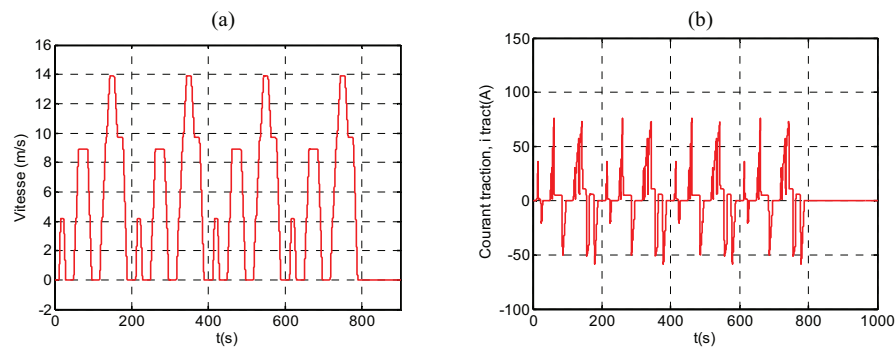
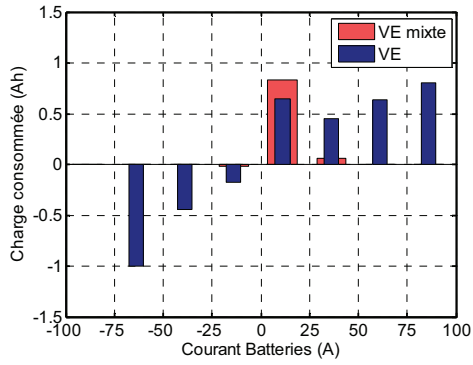
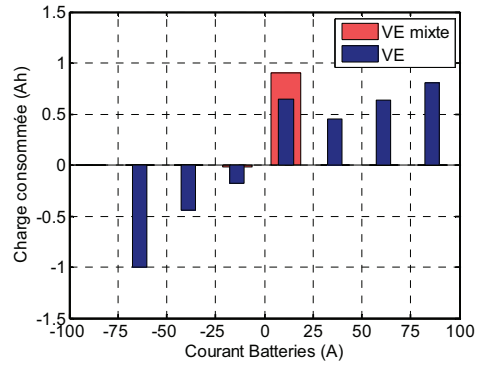


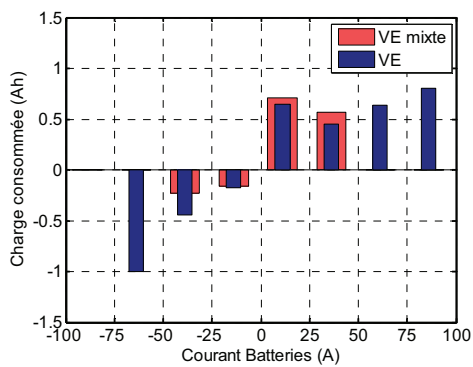
Figure 90. Vitesse et courant de traction sur 4 cycles ECE



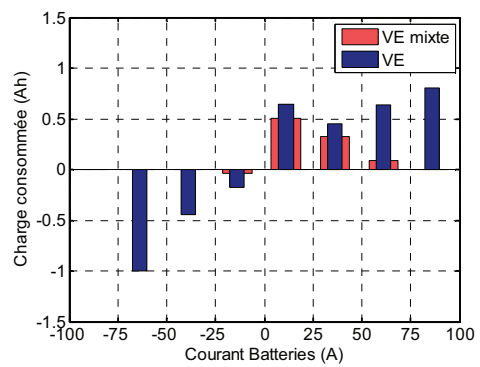
(a) Stratégie fonction des résistances des SSE électriques évoluée



(b) Stratégie fonction de l'accélération évoluée



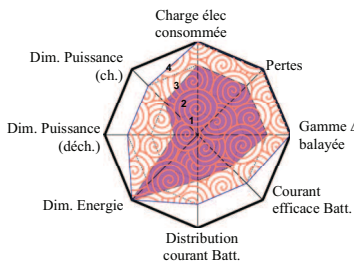
(c) Stratégie de filtrage évoluée



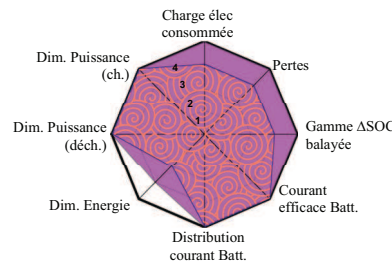
(d) Stratégie avec saturation variable du courant du banc batteries évoluée

Figure 91. Distribution du courant du banc de batteries pour les deux véhicules

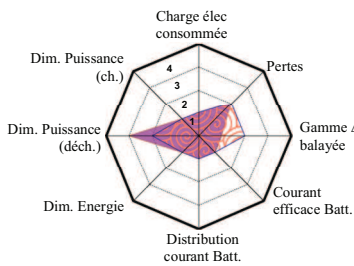
(a) Stratégie « fonction des résistances internes des SSE électriques »



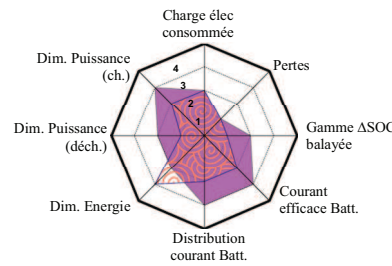
(b) Stratégie « fonction de l'accélération »



(c) Stratégie « de filtrage »



(d) Stratégie « avec saturation variable du courant du banc de batteries »



Stratégies évoluées
Stratégies de base

Figure 92. Comparaison des stratégies de base et évoluées du VE mixte

Résultats de simulation sur un cycle urbain ARTURB

Les deux véhicules sont maintenant comparés sur un cycle urbain ARTURB, cycle représentatif des conditions de conduite réelles en cycle urbain (Figure 93), [ANDRE 98].

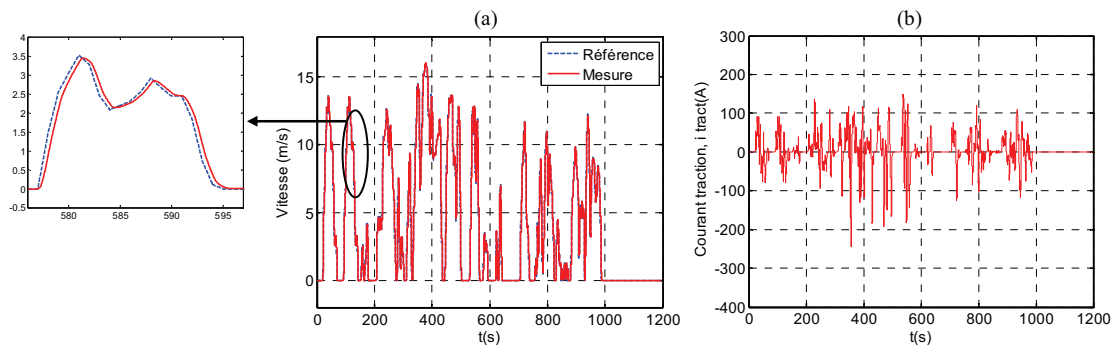


Figure 93. Vitesse et courant de traction sur 4 cycles ECE

Les résultats de simulation du VE avec batteries sont donnés Figure 94 et ceux du VE mixte avec batteries et supercondensateurs, pour différentes stratégies de gestion de l'énergie, Figure 95. La distribution de courant du banc de batteries pour les différentes stratégies est donnée Figure 96 et le positionnement des stratégies les unes par rapport aux autres Figure 97.

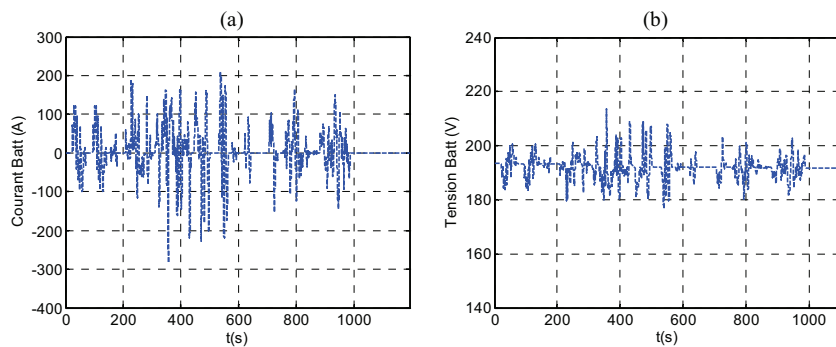
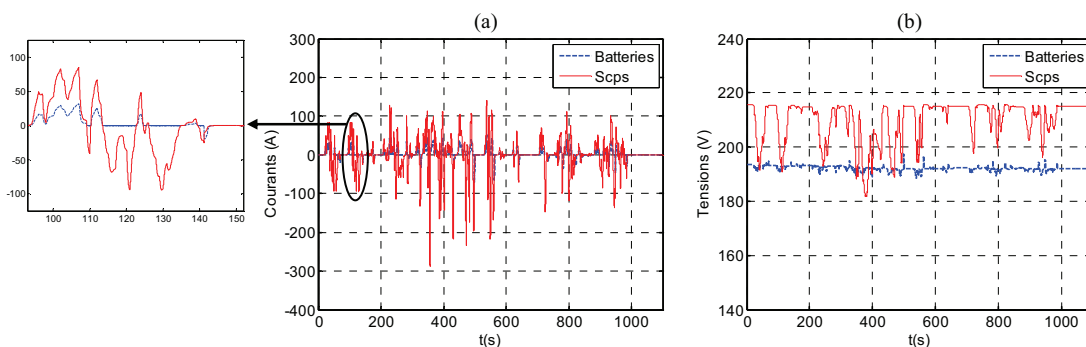
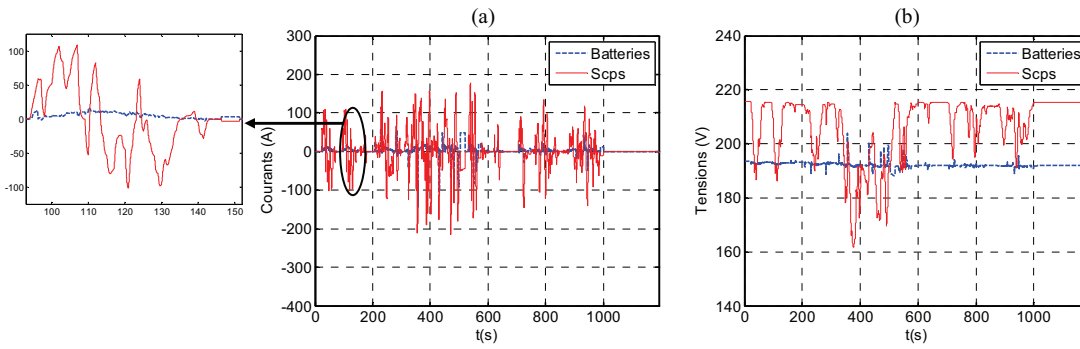


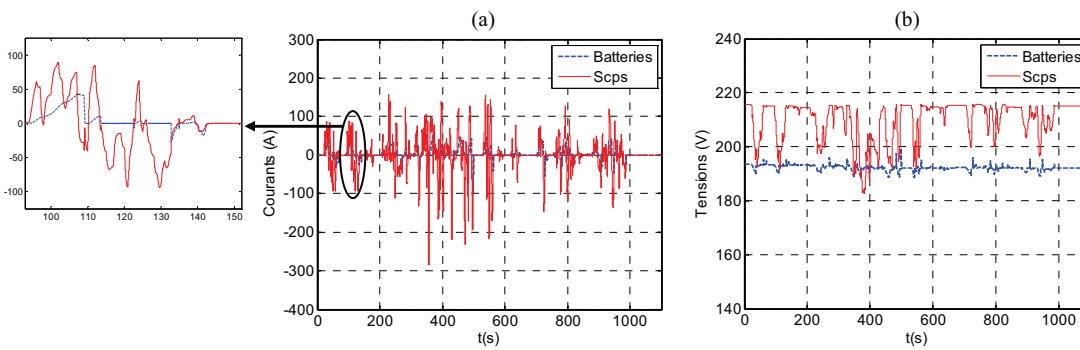
Figure 94. Résultats de simulation pour la voiture électrique mixte (cycle ARTURB)



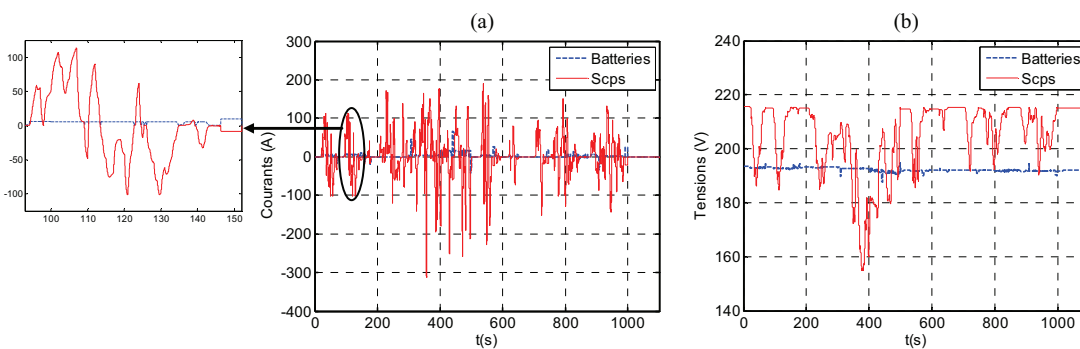
(A) Stratégie fonction des résistances des SSE électriques



(B) Stratégie fonction de l'accélération

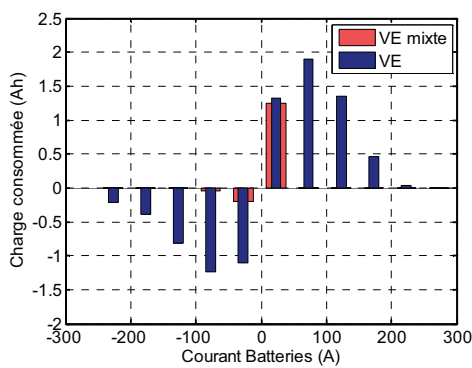


(C) Stratégie de filtrage

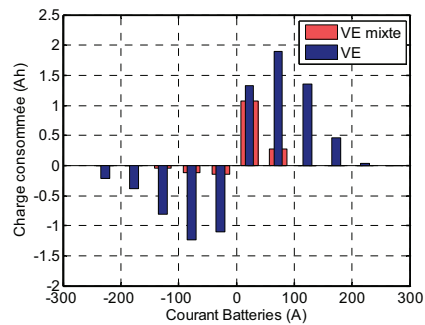


(D) Stratégie avec saturation variable du courant du banc batteries

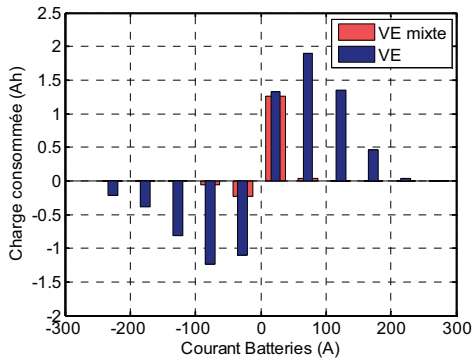
Figure 95. Résultats de simulation pour la voiture électrique mixte (cycle ARTURB)



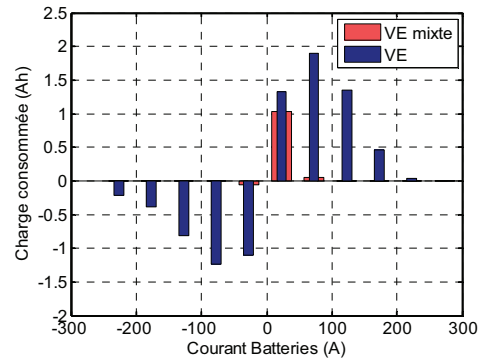
(a) Stratégie fonction des résistances des SSE électriques évoluée



(b) Stratégie fonction de l'accélération évoluée



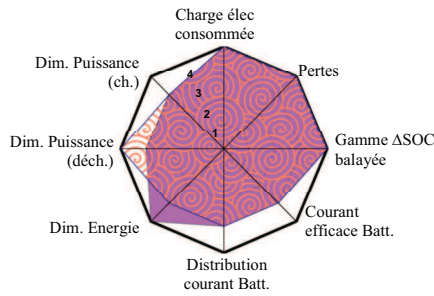
(c) Stratégie de filtrage évoluée



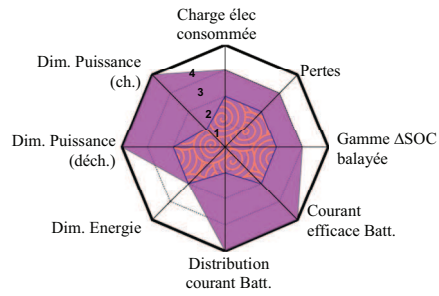
(d) Stratégie avec saturation variable du courant du banc batteries évoluée

Figure 96. Distribution du courant du banc de batteries pour les deux véhicules sur cycle ARTURB

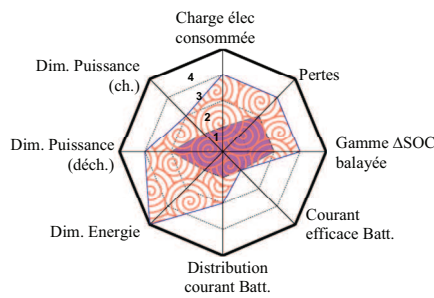
(a) Stratégie « fonction des résistances internes des SSE électriques »



(b) Stratégie « fonction de l'accélération »



(c) Stratégie « de filtrage »



(d) Stratégie « avec saturation variable du courant du banc de batteries »

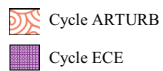
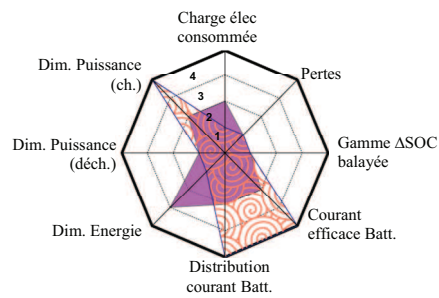


Figure 97. Comparaison des stratégies évoluées du VE mixte pour le cycle ECE et le cycle ARTURB

Annexe K: Comparaison des performances du VE mixte pour différents dimensionnements des batteries

La voiture électrique mixte avec le dimensionnement du banc de batteries initial est comparée à la même voiture après redimensionnement du banc de batteries, sur l'ensemble des critères étudiés précédemment. Les stratégies de gestion de l'énergie testées sont les suivantes :

- Stratégie 1 : fonction des résistances internes des SSE électriques (cf. chapitre 4, § 4.5)
- Stratégie 2 : fonction de l'accélération (cf. chapitre 4, § 4.5)
- Stratégie 3 : Stratégie de filtrage (Figure 98, Figure 99, Tableau 10)
- Stratégie 4 : Stratégie avec saturation variable du courant du banc de batteries (Figure 100, Figure 101, Tableau 11).

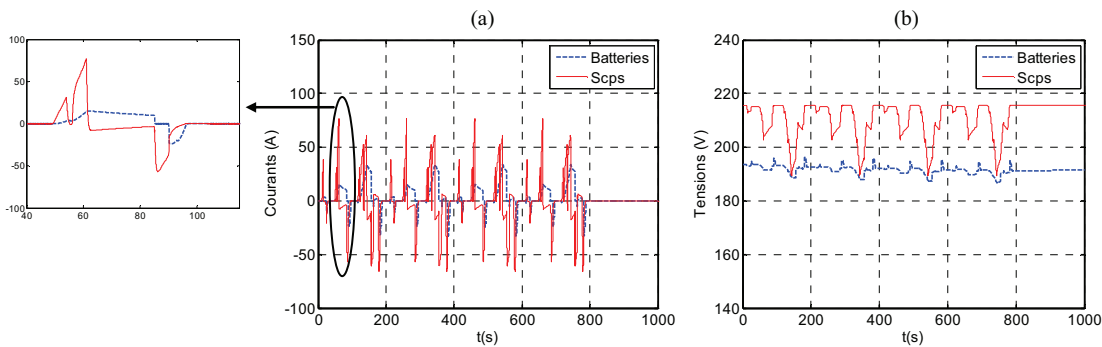
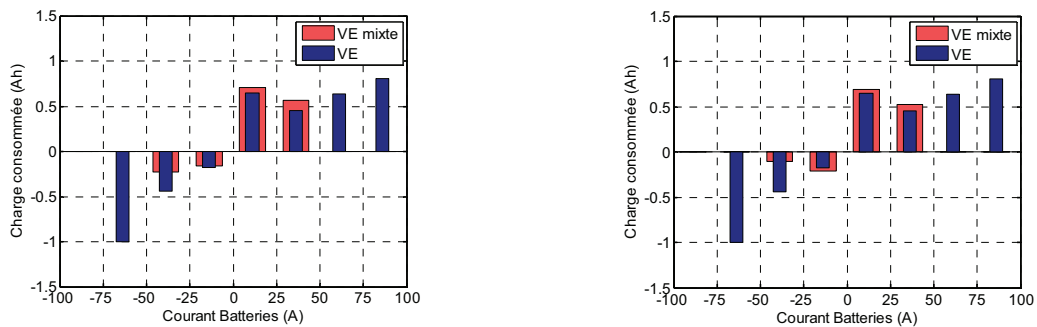


Figure 98. Résultats de simulation pour après redimensionnements (Stratégie 3)



(a) Avec dimensionnement initial

(b) Après redimensionnement des batteries

Figure 99. Distribution de courant pour les deux dimensionnements (Stratégie 3)

Tableau 10. Comparaison du VE mixte pour deux dimensionnements de bancs de batteries (Stratégie 3)

	$\Delta Q_{batt\ cons\ om}$ (mAh)	$E_{pertes\ SSE}$ (Wh)	ΔSOC_{batt} _balayée (%)	$I_{batt\ eff}$ (A) pour une batterie	$E_{dim\ energie}$ (W.h)	$E_{dim\ puissance}$ (décharge) (W.h)	$E_{dim\ puissance}$ (charge) (W.h)
Avec dimensionnement initial	889 (+5%*)	7,3 (-57%*)	1,12 (-20%*)	3,63 (-59%*)	223 (-16%*)	900 (-64%*)	7382 (-49%*)
Après redimensionnement	895 (-4,7%*)	8,4 (-51%*)	1,86 (+32%*)	4,06 (-54%*)	220 (-17%*)	847 (-66%*)	6304 (-57%*)

* Par rapport au VE avec batteries seules

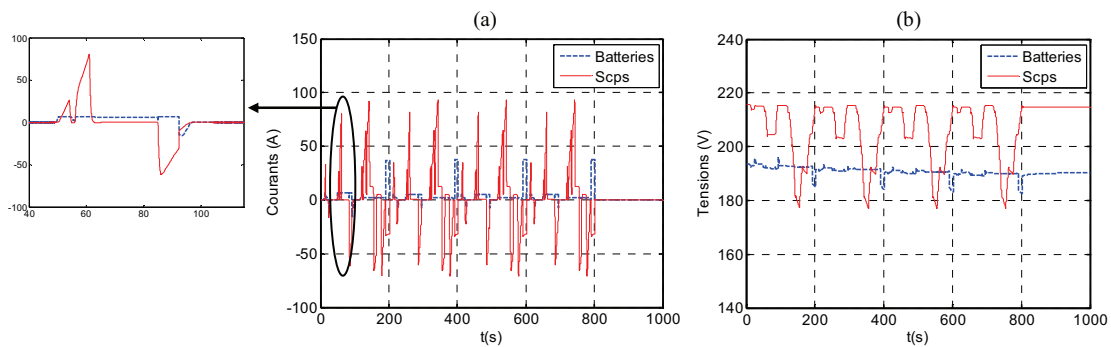
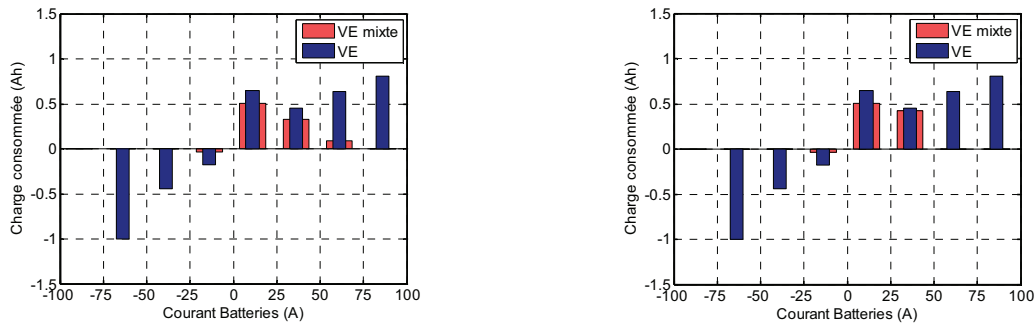


Figure 100. Résultats de simulation pour les deux dimensionnements (Stratégie 4)



(a) Avec dimensionnement initial

(b) Après redimensionnement des batteries

Figure 101. Distribution de courant pour les deux dimensionnements (Stratégie 4)

Tableau 11. Comparaison du VE mixte pour deux dimensionnements de bancs de batteries (Stratégie 4)

	$\Delta Q_{batt\ cons\ om}$ (mAh)	$E_{pertes\ SSE}$ (Wh)	ΔSOC_{batt} _balayée (%)	$I_{batt\ eff}$ (A) pour une batterie	$E_{dim\ energie}$ (W.h)	$E_{dim\ puissance}$ (décharge) (W.h)	$E_{dim\ puissance}$ (charge) (W.h)
Avec dimensionnement initial	883 (-6%*)	8 (-53%*)	1,05 (-25%*)	2,55 (-71%*)	211 (-20%*)	959 (-62%*)	3333 (-77%)
Après redimensionnement	893 (-5%*)	10 (-43%*)	2,67 (+89%*)	4,66 (-54%*)	210 (-20%*)	925 (-63%*)	3055 (-78%*)

* Par rapport au VE avec batteries seules

Annexe L : Résultats expérimentaux du microbus électrique pour différentes stratégies

Le véhicule étudié est un microbus électrique mixte avec batteries / supercondensateurs (Figure 89). Il est comparé à un véhicule de référence, le même véhicule pour lequel les supercondensateurs ne sont pas utilisés.

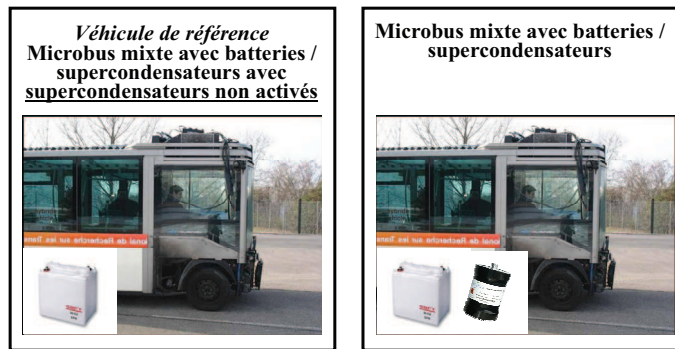


Figure 102. Véhicules étudiés

Le trajet considéré a été présenté au chapitre 3 (§ 3.1.3.6). Il est important de noter qu'étant donné que ce trajet est réel, la vitesse n'est pas parfaitement reproductible entre deux essais (Figure 103). De plus, pour chaque essai réalisé, l'état de charge initial du banc de batteries n'est pas le même, et le courant des accessoires n'est pas rigoureusement identique. Ainsi la comparaison des résultats donne uniquement les tendances.

Les résultats expérimentaux pour le véhicule de référence sont donnés Figure 104. Les résultats expérimentaux pour le microbus électrique mixte pour les stratégies de base « fonction des résistances internes » et « de filtrage » sont donnés Figure 105 et Figure 106, et pour la stratégie évoluée fonction de l'accélération sont donnés Figure 107. Pour les stratégies de base mises en place, à la différence de celles étudiées au chapitre 4, § 4.3, la recharge du banc de supercondensateurs ne s'effectue pas en fin de trajet mais lorsque le véhicule est à l'arrêt. Le courant de recharge a été fixé à 100A. Les distributions de courant pour les deux véhicules pour les différentes stratégies de gestion de l'énergie sont données Figure 91.

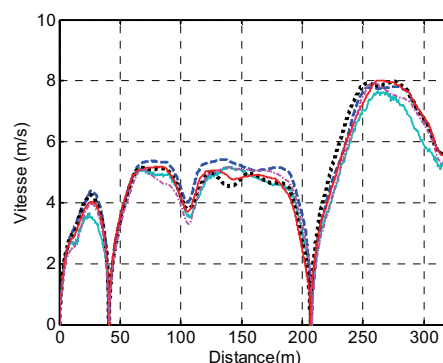


Figure 103. Reproductibilité de la vitesse pour les différents essais

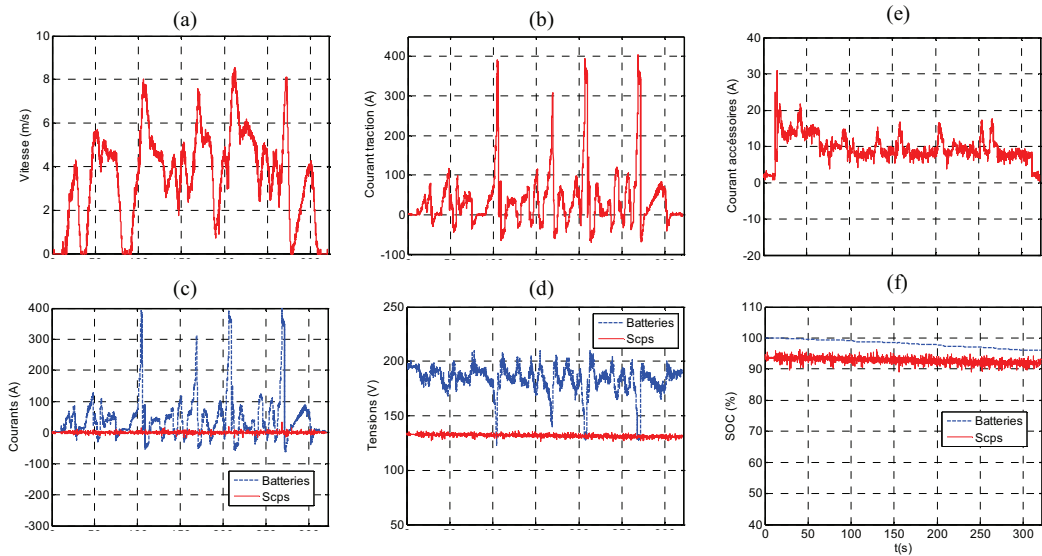


Figure 104. Résultats expérimentaux quand seules les batteries sont activées

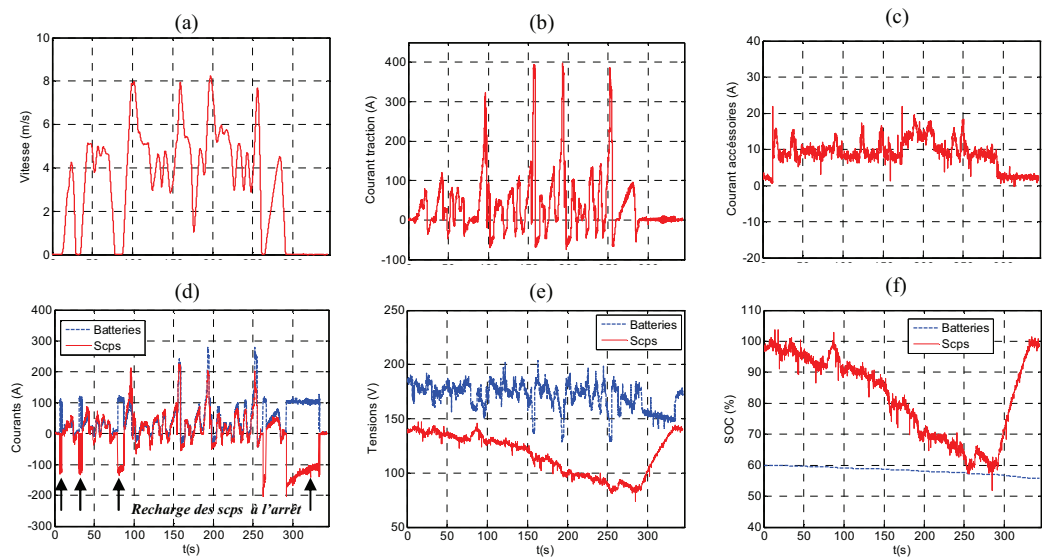


Figure 105. Résultats expérimentaux pour la stratégie de base « fonction des résistances internes »

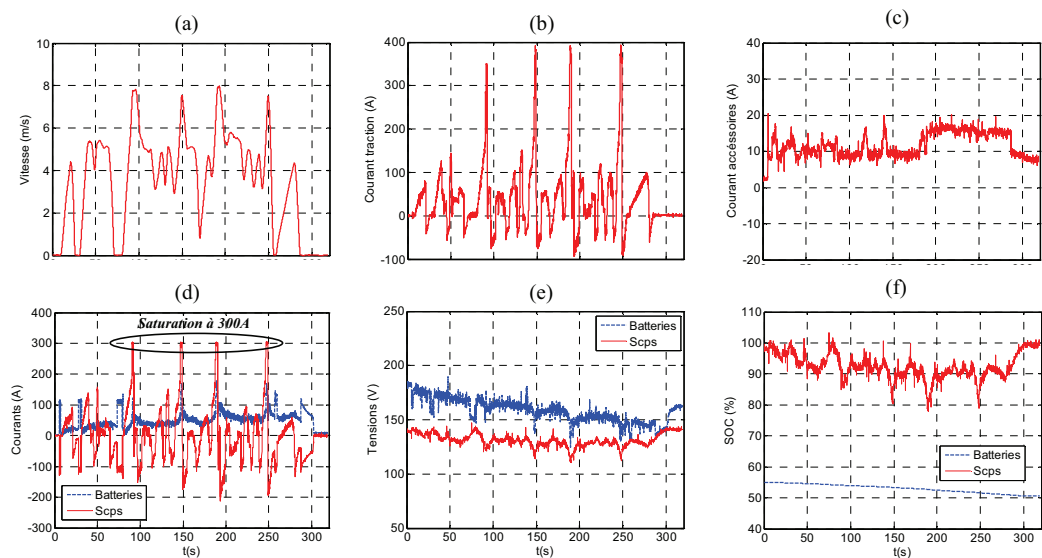


Figure 106. Résultats expérimentaux pour la stratégie de base « de filtrage »

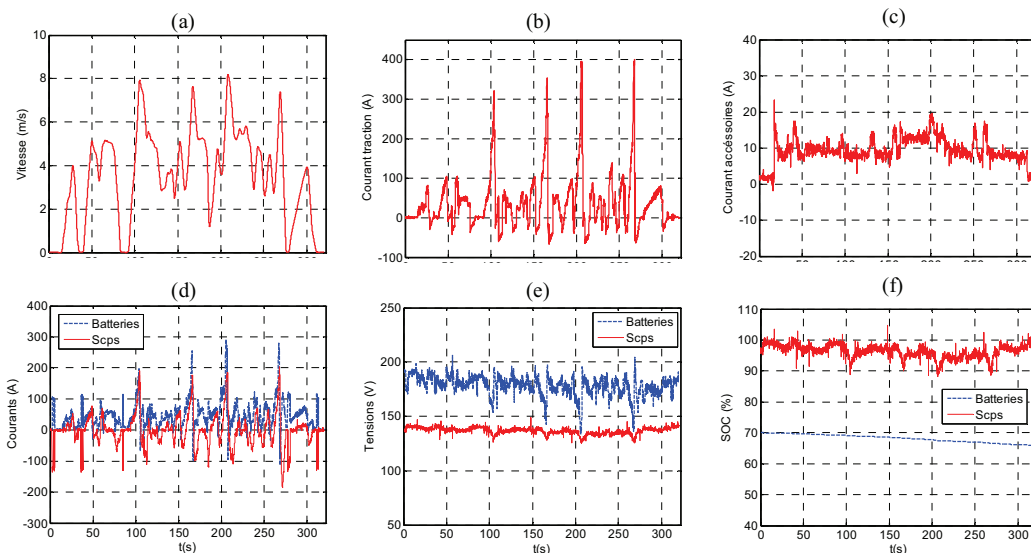
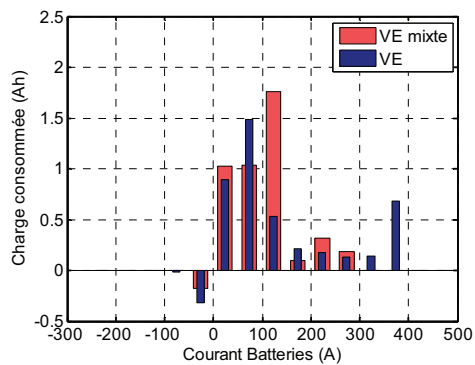
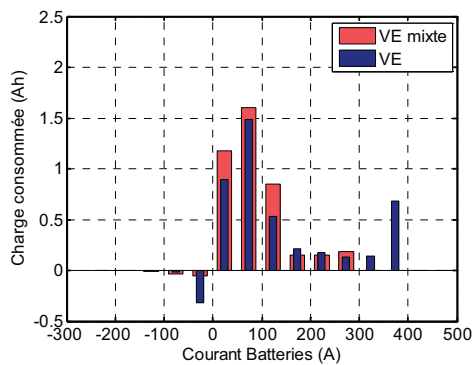


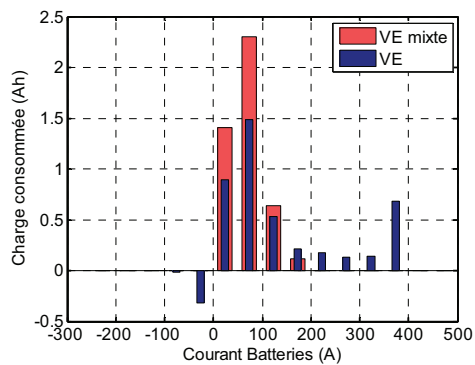
Figure 107. Résultats expérimentaux pour la stratégie évoluée « fonction de l'accélération »



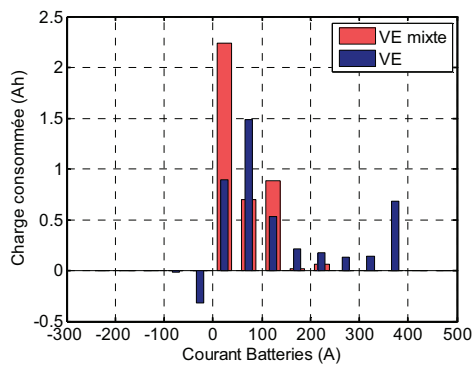
(a) Stratégie de base « fonction des résistances internes »



(b) Stratégie évoluée « fonction de l'accélération »



(c) Stratégie de base « de filtrage »



(d) Stratégie évoluée « avec saturation variable du courant du banc de batteries »

Figure 108. Distribution du courant du banc de batteries pour les deux véhicules

Glossaire

Acronymes

AGM : Absorbant Glass Material
BF : Basse Fréquence
BMS : Batterie Management System
CO₂ : Dioxyde de carbone
DOD: Depth Of Discharge (profondeur de décharge)
FFV: Flex-Fuel Vehicule (véhicule polycarburant)
H₂ : Dihydrogène
HF : Haute Fréquence
IP : Intégral Proportionnel
Ni-Cd : Nickel Cadium
Ni-MH : Nickel Métal Hydrure
OCV : Open Circuit Voltage (tension à vide)
P : Proportionnel
PAC : Pile A Combustible
Pb : Plomb
PI : Proportionnel Intégral
REM : Représentation Energétique Macroscopique
SAU : Surface Agricole Utile
SE : Source Electrique
SOC : State of Charge (état de charge)
SSE : Système de Stockage d'Énergie
TER : Transport Express Régional
TGV : Train à Grande Vitesse
TRN : Train Rapides Nationaux
VE : Véhicule Electrique
VEH : Véhicule Electrique Hybride
VH : Véhicule Hybride
VT : Véhicule Thermique

Unités

A : Ampère
Ah : Ampère heure
F : Farad
H : Henri
Hz : Hertz
J : Joule
kg : Kilogramme
m : Mètre
N : Newton
rad : Radian
s : Seconde
V : Volt
Wh : Watt heure
Ω : Ohm

Notations

Batt : batterie
C_{orr} : correcteur
H : hacheur
K : interrupteur
S.T. : système de traction
S_C : source de courant
Scp : supercondensateur
S_T : source de tension

Variables électriques

C : condensateur [F]
d : taux de décharge
i : courant [A]
L : inductance [H]
m : fonction de modulation
N_p : nombres de batteries ou supercondensateurs en parallèle
N_s : nombres de batteries ou supercondensateurs en série
OCV : tension à vide [V]
r ou R : résistance [Ω]
u : tension [V]
 η : rendement faradique

E : énergie [Wh] ou [J]
f : fréquence [Hz]
k_d : coefficient de distribution
P : puissance [W]
T : période [s]
t : temps [s]
 τ : constante de temps [s]

Variables mécaniques

a : accélération [m^2/s]
C : couple [N.m]
c_{aero} : coefficient de frottements aérodynamiques
c_{visq} : coefficient de frottements visqueux
F : force [N]
J : inertie [kg.m^2]
k_{diff} : rapport du pont différentiel
M : masse [kg]
n_{roue} : nombre de roue
p : pente
R_{roue} : rayon d'une roue [m]
v : vitesse [m/s]
 α : inclinaison
 Ω : vitesse de rotation [rad/s]

Bibliographie

- ACCESS 07 *Hydrogène vecteur d'énergie de demain ?* [en ligne]. Disponible sur : <<http://acces.inrp.fr>> (consulté le 15.09.07).
- ADEME 07 *Changement climatique.* [en ligne]. Disponible sur : <<http://www2.ademe.fr>> (consulté le 17.09.07).
- ADINOLFI 98 ADINOLFI (A.), LAMEDICA (R.), MODESTO (C.), PRUDENZI (A.), VIMERCATI (S.). Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *IEEE trans. on Power Delivery*, October 1998, vol. 13, no. 4, pp. 1536–1542.
- AKLI 07 AKLI (C. R.), ROBOAM (X.), SARENIL (B.), JEUNESSE (A.). Energy management and size of hybrid locomotive. *IEEE, PEA'07*, September 2007.
- AKLI 08 AKLI (C. R.). *Conception systémique d'une locomotive hybride autonome.* 262 p. Thèse de doctorat : Génie électrique : Institut national polytechnique de Toulouse : 2008.
- ALLEGRE 07 ALLEGRE (A.-L.). Etude du système d'alimentation embarqué avec supercondensateurs du futur Neoval. 58 p. Master recherche : Génie électrique : Université Lille1, Sciences et Technologies : 2007.
- ALLEGRE 08 ALLEGRE, (A.-L.), DELARUE (P.), BARRADE (B.), BOUSCAYROL (A.), CHATTOT (E.), EL-FASSI (S.). Influence of limitations of the traction system on energy storage design. *Electrimacs'08*, June 2008, Québec, Canada.
- ALLEGRE 09 ALLEGRE, (A.-L.), BOUSCAYROL (A.), TRIGUI (R.). Influence of control strategies on hybrid Energy Storage Systems for traction applications. *IEEE-PPC'09*, September 2009, Detroit, USA.
- ALLEGRE 10a ALLEGRE, (A.-L.), BARRADE (P.), DELARUE (P.), BOUSCAYROL (A.), CHATTOT (E.), EL-FASSI (S.). Possibilities of reduction of the on-board energy for an innovative subway. *WEVA Journal*, Vol. 3, ISBN. ISSN 2032-6653, 1-2010. [on line]. Available on : <<http://www.wevaonline.net/>>
- ALLEGRE 10b ALLEGRE, (A.-L.), BOUSCAYROL (A.), VERHILLE (J.-N.), DELARUE (P.), CHATTOT (E.), EL-FASSI (S.). Reduced-scale power Hardware-In-the-Loop simulation of an innovative subway. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 4, April 2010, pp. 1175-1185.
- ALLEGRE 10c ALLEGRE, (A.-L.), BOUSCAYROL (A.), DELARUE (P.), BARRADE (B.), CHATTOT (E.), EL-FASSI (S.). Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, December 2010, pp. 4001 - 4012.

- AMJADI 10 AMJADI (Z.), WILLIAMSON (S. S.). A novel control technique for a switched capacitor based hybrid electric vehicle energy. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, December 2010, pp. 926 - 934.
- ANDRE 98 ANDRE (M.). Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules. Thèse de doctorat : INSA Lyon, INRETS, LTE de Bron : 1998.
- AUTO 08 AUTO ACTUALITE. *Une voiture propre, maintenant!* Revue n°63, Juin 2008.
- AWERBUCH 08 AWERBUCH (J.), SULLIVAN (C.). Control of ultracapitor-battery hybrid power source for vehicular applications. *IEEE Energy2030*, November 2008, Atlanta, Georgia, USA.
- AYAD 04 AYAD (M-Y.). *Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues*. 119 p. Thèse de doctorat : Génie électrique : Institut national polytechnique de Lorraine : 2004. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.green.uhp-nancy.fr>> (consulté le 04.09.08).
- AZIB 09 AZIB (T.), BETHOUX (O.), RELY (G.), MARCHAND (C.). Structure and control strategy for a parallel hybrid fuel cell / supercapacitors power source. *IEEE-VPPC'09*, September 2009, Detroit, USA.
- BADIN 97 BADIN (F.). *Contribution à la modélisation des transmissions hybrides thermiques électriques séries, réalisation d'un bilan énergie pollution en usage réel*. 409 p. Thèse de doctorat : Génie de l'environnement : Université de Savoie : 1997.
- BARRADE 01 BARRADE (P.), RUFER (A.). Power smoothing and high power fast energy exchange between storage systems. *Ansoft's Inspiring Next Electromechanical Users'Workshop*, 2001.
- BARRADE 02 BARRADE (P.), HOTELLIER (D.), RUFER (A.). Energy feeding with sequential storage: properties of the fast energy transfer between supercapacitive tanks. *EE-SAT '02*, April 2002, San Francisco, USA.
- BARRADE 03a BARRADE (P.). Energy storage and applications with supercapacitors. *Evoluzionz Tecnologica e Problematiche Emergenti*, March 2003, Bressanone, Italy.
- BARRADE 03b BARRADE (P.), RUFER (A.). Maquette de train alimenté par biberonnage : un outil d'enseignement et de recherche pluridisciplinaire. *CETISIS-EEA 2003*, Novembre 2003, Toulouse, France.
- BARRERO 08 BARRERO (R.), VAN MIERLO (J.), TACKOEN (X.). Energy savings in public transport. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, September 2008, vol. 3, no. 3, pp. 26-36.

- BELHACHEMI 04 BELHACHEMI (F.). *Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à double couche électrique utilisés en électronique de puissance*. 148p. Thèse de doctorat : Génie électrique : Institut national polytechnique de Lorraine : 2001. [en ligne]. 2004. Disponible sur : <<http://www.green.uhp-nancy.fr>> (consulté le 05.09.08).
- BEN AHMED 05 BEN AHMED (H.), MULTON (B.), ROBIN (G.), RUELLAN (M.). Le stockage de l'énergie dans les applications stationnaires. *Revue Technologie - sciences et techniques industrielles*, Mars 2005, n° 136, pp. 60-66.
- BIOGASMAX 08 BIOGASMAX. Carburant renouvelable pour les transports. Avril 2008. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.lillemetropole.fr>> (consulté le 28.03.10).
- BOUJELBEN 08 BOUJELBEN (M.). *Projet Microbus hybride série. Rapport final*. Rapport interne INRETS-LTE 0830, Décembre 2008.
- BOULON 08 BOULON (L.), HISSEL (D.), PERA (M-C.). *Multi-physics modelling and energy management of a battery supercapacitor electric vehicle taking into account the operating temperature conditions*. Electrimacs'08, Juin 2008, Québec, Canada.
- BOULON 09 BOULON (L.) Modélisation multi-physique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie. 176 p. Thèse de doctorat : Sciences pour l'ingénieur : Université de Franche-Comté : 2009.
- BOUSCAYROL 00 BOUSCAYROL (A.), DAVAT (B.), FORNEL (B.), FRANCOIS (B.), HAUTIER (J. P.), MEIBODY-TALAR (F.), PIETRZAK-DAVID (M.). Multimachine Multi-converter System: application for electromechanical drives. *European Physics Journal - Applied Physics*, vol. 10, no. 2, May 2000, pp. 131-147.
- BOUSCAYROL 03 BOUSCAYROL (A.). *Formalisme de représentation et de commande appliqués aux systèmes électromécaniques multimachines multiconvertisseurs*. HDR : Génie électrique : Université Lille 1, Sciences et Technologies : 2003.
- BOUSCAYROL 05 BOUSCAYROL (A.), DELARUE (P.), FRANCOIS (B.), NIIRANEN (J.). Control implementation of a five-leg AC-AC converter to supply a three-phase induction machine. *IEEE trans. on Power Electronics*, January 2005, vol. 20, no. 1, pp. 107-115.
- BOUSCAYROL 08 BOUSCAYROL (A.). Different types of Hardware-In-the-Loop simulation for electric drives. *IEEE-ISIE'08*, June 2008, Cambridge, UK.
- BOUSCAYROL 09 BOUSCAYROL (A.). *Plate-forme expérimentale pour la validation du système de stockage du métro Neoval*. Rapport interne n°3 du L2EP, Université Lille1, Mai 2009.

- BOUSCAYROL 10 BOUSCAYROL (A.). Hardware-In-the-Loop simulation. *Industrial Electronics Handbook, second edition*, tome 3, Chapter M35, Editions Taylor & Francis, Chicago, to be published in 2010, ISBN 9781848210967.
- BRUYERE 09 BRUYERE (A.). *Modélisation et commande d'un alterno-démarrreur heptaphasé pour une application automobile micro-hybride*. 176 p. Thèse de doctorat : Génie électrique : Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Lille : 2009.
- BURKE 07 BURKE (A.F.). Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Proceeding of the IEEE*, April 2007, vol. 95, no. 4, pp. 806-820.
- CARTER 08 CARTER (R.), CRUDEN (A.). Strategies for control of a battery / supercapacitor system in an electric vehicle. *SPEEDAM'08*, June 2008, Capri, Italy.
- CAUMONT 97 CAUMONT (O.). *Détermination de l'état de charge d'une batterie plomb acide en utilisation véhicule électrique*. 177 p. Thèse de doctorat : Génie électrique : Université Lille1: 1997.
- CCFA 01 Les dossiers du CCFA. *Automobile et qualité de l'air*. [en ligne]. 2001. Disponible sur : <<http://www.ccfa.fr>> (consulté le 14.09.07).
- CCFA 04 Les dossiers du CCFA. *Emissions de CO2 les transports routiers mobilisés*. [en ligne]. 2004. Disponible sur : <<http://www.ccfa.fr>> (consulté le 14.09.07).
- CEA 04 Les dossiers du CEA. *L'hydrogène*. [en ligne]. 2004. Disponible sur : <<http://www.cea.fr>> (consulté le 14.09.07).
- CHAN 00 CHAN (H.L.). A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicle power systems. *IEEE Power Engineering Society Meeting 2000*, January 2000, vol. 1, p 470-475.
- CHAN 04 CHAN (C.C.). WONG (Y.S.). The state of the art of electric vehicles technology. *IEEE-IPEMC'04*, August 2004, Xian, China, vol. 1, pp. 46-57.
- CHAN 07 CHAN (C.C.). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceeding of the IEEE*, April 2007, vol. 95, no.4, pp. 704-718.
- CHAN 10 CHAN (C. C.), BOUSCAYROL (A.), CHEN (K.). Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: architectures and modelling. *IEEE trans. on Vehicular Technology*, February 2010, vol. 59, no. 2, pp. 589-598.
- CHAPOULIE 99 CHAPOULIE (P.), *Modélisation systémique pour la conception de véhicules électriques multi-sources, application aux véhicules équipés de générateurs photovoltaïques ou de supercondensateurs*. Thèse de doctorat : Génie Electrique : INPT Toulouse : janvier 1999.

- CHATTOT 07 CHATTOT (E.). *Energy storage input parameters*. Internal report STS, April 2007.
- CHEN 10 CHEN (C.). *A common energetic macroscopic representation and unified control structure for different hybrid electric vehicles*. 198p. Thèse de doctorat : Génie Electrique : Université Lille1, Sciences et Technologies : 2010.
- CHRENKO 08 CHRENKO (D.). *Energetic Macroscopic Representation Modeling and Control of a Low Temperature Fuel Cell System Fed by Hydrocarbons*. Thèse de doctorat : Sciences pour l'ingénieur : Université de Franche-Comté : 2008.
- CLEAN 07 CLEAN AUTO. *BlueCar, une nouvelle génération de voitures électriques*. [en ligne]. 2005. Disponible sur : <<http://www.clean-auto.com>> (consulté le 20.09.07).
- DELARUE 03 DELARUE (P.), BOUSCAYROL (A.), SEMAIL (E.). Generic control method of multi-leg voltage-source-converters for fast practical implementation. *IEEE trans. on Power Electronics*, March 2003, vol. 18, no. 2, pp. 517-526.
- DELFOSSÉ 08 DELFOSSÉ (F.). *Détermination de l'état de charge des batteries d'un véhicule électrique*. Travail de fin d'étude : Sciences appliquées : Université de Liège : 1998. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.montefiore.ulg.ac.be>> (consulté le 14.02.08).
- DESTRAZ 08 DESTRAZ (B.). *Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicule à propulsion électrique et hybride*. 283 p. Thèse de doctorat : Génie électrique : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : 2008.
- DESTRAZ 09 DESTRAZ (B.), BARRADE (P.), RUFER (A.), KLOHR (M.). Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network. *EPE'07*, September 2007, Aalborg, Denmark.
- DOUGAL 02 DOUGAL (R. A.), LIU (S.), WHITE (R. E.). Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids. *IEEE trans. on Components and Packaging Technologies*, March 2002, vol. 25, no. 1, pp. 120-131.
- DURR 06 DURR (M.), CRUDEN (A.), GAIR (S.), McDONALD (J.R.). Dynamic model of a lead acid model battery for use in a domestic fuel cell system. *Journal of Power Sources*, October 2006, vol. 161, no. 2, p.1400-1411.
- EHSANI 05 EHSANI (M.), GAO (Y.), E.GAY, EMADI (A.). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. Florida: CRC Press LLC, 2005. 395p. ISBN 0-8493-3154-4.
- EHSANI 07 EHSANI (M.), MILLER (M.). Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives. *Proceeding of the IEEE*, April 2007, vol. 95, pp. 719-728.

- EL KADRI 06 EL KADRI (K.), BERTHON (A.). Simulation of a dual hybrid generator for heavy application. *IEEE-IECON '06*, November 2006, Paris, France, pp. 2642-2647.
- EMADI 08 EMADI (A.), LEE (Y. J.), RAJASHEKARA (K.). Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, June 2008, vol. 55, no. 6, pp. 2237-2245.
- ENERGIE 10 ENERGIE ET DEVELOPPEMENT DURABLE. *Dossier : Biocarburants, le choix du Brésil*. Revue n° 28, Février 2010.
- EUROPA 07 EUROPA-BATTERIES. *Batteries acide plomb étanche, AGM ou gel?* [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.europa-batteries.com> >. (consulté le 09.09.08).
- EVERS 06 EVERS (W.). Energy storage on board of trolleybuses. *ESSCAP'06*, November 2006, Lausanne, Switzerland.
- FARANDA 07 FARANDA (R.), GALLINA (M.), SON (D.T.). A new simplifies model of double layer capacitors. *ICCEP'07*, May 2007, p. 706-710.
- FERREIRA 08 FERREIRA (A. A.), POMILIO (J. A.), SPIAZZI (G.), DE ARAUJO SILVA (L.). Energy Management fuzzy logic supervisory for electric Vehicle power supplies system. *IEEE trans. on Power Electronics*, January 2008, vol. 23, no. 1, pp.107-115.
- FOCH 89 FOCH (H.). *Éléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques. Technique de l'ingénieur, D3152*, 1989.
- FOIADELLI 06 FOIADELLI (F.), ROSCIA (M.), ZANINELLI (D.). Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems. *IEEE PES General Meeting 2006*, June 2006, Quebec, Canada.
- FORGEZ 09 FORGEZ (C.). *Contribution à la modélisation et à l'identification temps réel pour les systèmes à énergie électrique embarqué. HDR : Génie électrique : Université de Technologie de Compiègne : 2009.*
- GAO 03 GAO (L.), DOUGAK (R. A.), LIU (S.). Active Power Sharing in hybrid battery / capacitor power source. *IEEE-APEC'03*, February 2003, vol. 1, pp. 497-503.
- GARCIA 07 GARCIA-ARREGUI (M.), TURPIN (C.), ASTIER (S.). Direct connection between a fuel cell and ultracapacitors. *IEEE-ICCEP'07*, May 2007, Capri, Italy.
- GAUCHIA 09 GAUCHIA (L.). *Non linear dynamic per-unit models for electrochemical energy systems, application to hardware-in-the-loop hybrid simulation*. 156 p. Doctoral thesis: electrochemistry: Universidad Carlos III de Madrid: 2009.

- GIEC 07 Rapport du GIEC. *Changements climatiques 2007 : rapport de synthèse*. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.ipcc.ch>> (consulté le 02.03.10)
- GUIDI 09 GUIDI (G.), UNDELAND (T.M.), HORI (Y.). Effectiveness of supercapacitors as power-assist in pure EV using sodium-nickel chloride battery as main energy storage. *EVS24*, May 2009, Stavanger, Norway.
- HAMMAR 06 HAMMAR (A.), LALLEMAND (R.), VENET (P.), COQUERY (G.), ROJAT (G.), CHABAS (J.). Electrical characterization and modelling of round spiral supercapacitors for high power applications. *ESCAP'06*, 2006, Lausanne, Switzerland.
- HAUTIER 96 HAUTIER (J. P.), FAUCHER (J.). Le graphe informationnel causal. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 90, pp. 167-189, juin 1996.
- HAUTIER 99 HAUTIER (J. P.), CARON (J. P.). *Convertisseurs statiques : méthodologie causale de modélisation et de commande*. Edition Technip, Paris, 1999.
- HUSAIN 03 HUSAIN (I.). *Electric and hybrid vehicles – Design fundamentals*. CRC Press, 2003, 269p. IBSN : 0-8493-1466-6.
- IZZO 07 IZZO (P.). *Notion sur les accumulateurs au plomb acide*. [en ligne]. Disponible sur : <http://pagesperso-orange.fr/xcotton/electron/Notion_Accumulateur_Pb.pdf> (consulté le 14.02.08).
- JINRUI 06 JINRUI (N.), FENGCHUN (S.), QINGLIAN (R.). A study of energy management system of electric vehicles. *IEEE-VPPC'06*, September 2006, Windsor, UK.
- JUFER 08 JUFER (M.). Electric Drive System for Automatic Guided Vehicles Using Contact-free Energy Transmission. *EPE-PEMC'08*, 1-3 September, Poland.
- KERMANI 09 KERMANI (S.). Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel. 213 p. : Thèse de doctorat : Automatique : Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis : 2009.
- KHUN 02 KUHN (E.), FORGEZ (C.), FRIEDRICH (G.). Modèle pour accumulateurs Ni-mH en vue d'une application pour véhicule hybride électrique. *EPF'02*, novembre 2002, Montpellier, France.
- KHUN 06 KUHN (E.), FORGEZ (C.), LAGONOTTE (P.), FRIEDRICH (G.). Modelling Ni-mH battery using Cauer and foster structures. *LABAT' 05, Journal of Power Sources*, August 2006, vol. 158, no. 2, pp.1490-1497.
- KIM 97 KIM (Y-H.), HA (H-D.). Design of interfaces circuits with electrical battery models. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, Feb. 1997, vol. 44, pp. 81-86.

- LASSEGUES 01 LASSEGUES (J-C.). Supercondensateurs. *Techniques de l'ingénieur*, 2001, D3334.
- LE SAUX 09 LE SAUX (G.). *Comment développer le biogaz-carburant ? Le projet européen biogasmx*. Juin 2009. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.biogasmx.fr>> (consulté le 28.03.10).
- LETROUVE 09 LETROUVE (T.). Influence of a clutch model in a simulation of a parallel hybrid electric vehicle. *IEEE-VPPC'09*, September 2009, Detroit, USA.
- LHOMME 05 LHOMME (W.), DELARUE (P.), BARRADE (P.), BOUSCAYROL (A.), RUFER (A.). *Design and control of a supercapacitor storage system for traction applications*. *IEEE-IAS'05*, October 2005, Hong-Kong, pp. 2013-2020.
- LHOMME 07 LHOMME (W.). *Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique*. 188 p. Thèse de doctorat : Génie Electrique : Université Lille 1, Sciences et Technologies : 2007.
- LHOMME 09 LHOMME (W.), DELARUE (P.), BOUSCAYROL (A.), LEMOIGNE (P.), BARRADE (P.), RUFER (A.). Comparison of control strategies for maximizing energy in a supercapacitor storage subsystem. *EPE Journal*, September 2009, vol. 19, no. 3, pp. 5-14.
- LIU 10 LIU (H.), WANG (Z.), CHENG (J.), DOUGLAS (M.). Improvement on the cold cranking capacity of the commercial vehicle by using supercapacitor and lead-acid battery hybrid. *IEEE trans. on Vehicular Technology*, March 2009, vol. 58, no. 3, pp. 1097-1105.
- LUKIC 06 LUKIC (S. M.), WIRASINGHA (S. G.), RODRIGUEZ (F.), CAO (J.), EMADI (A.). Power management of an ultracapacitor / battery hybrid energy storage system in a HEV. *IEEE-VPPC'06*, Septembre 2006, Windsor, UK.
- LUKIC 08 LUKIC (S. M.), CAO (J.), BANSAL (R. C.), RODRIGUEZ (F.), EMADI (A.). Energy storage systems for automotive applications. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, June 2008, vol. 55, no. 6, pp. 2258-2267.
- MACLAY 97 MACLAY (D.). Simulation gets into the loop. *IEEE Review*, May 1997, pp. 109-112.
- MARANO 09 MARANO (V.), ONORI (S.), GUEZENNEC (Y.), MADELLA (N.). Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE-VPPC'09*, September 2009, Detroit, USA.
- MATAGNE 04 MATAGNE (E.). *Modélisation des batteries*. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.lei.ucl.ac.be>> (consulté le 14.02.08).

- MEMETEAU 06 MEMETEAU (H.). *Technologie fonctionnelle de l'automobile*. Tome 1 et 2. 5^{ème} édition, Dunod, 2006. ISBN 2-10-049718-9 et 2-10-049719-7.
- MILLER 05 MILLER (J.), McCLEER (P. J.), EVERETT (M.), STRANGAS (E. G.). Ultracapacitor plus battery energy storage system sizing methodology for HEV power split electronic CVT's. *IEEE-ISIE'05*, June 2005, Dubrovnik, Croatia.
- MONTARU 08 MONTARU (M.), PELISSIER (S.). Frequency and temporal identification of Li-ion polymer battery model using fractional impedance. *Les Rencontres scientifiques de l'IFP - Advances in Hybrid powertrains*, November 2008, Rueil-Malmaison, France.
- MONTARU 09 MONTARU (M.). *Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*. 279 p. Thèse de doctorat : Electrochimie : Institut Polytechnique de Grenoble : 2009.
- MORENO 06 MORENO (J.), ORTUZAR (M.), DIXON (J.). Energy-management systems for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks. *IEEE, trans. on Industrial Electronics*, April 2006, vol. 53, no. 2, pp. 614-623.
- MOSCADE 03 MOSCADE (R.). Transport électrique routier : véhicules électriques à pile à combustible. *Techniques de l'ingénieur*, Mai 2003, D 5570.
- MOYSAN 06 MOYSAN (I.). Le stockage embarqué de l'hydrogène. Clefs CEA, N° 50 /51, hiver 2004-2005. [en ligne]. Disponible sur : <www.cea.fr> (consulté le 10.06.10).
- OLSZEWSKY 06 OLSZEWSKY (M.), STAUNTON (R. H.), AYER (C. W.), MARLINO (L. D.), CHIASSION (J. N.), BURRESS (T. A.). Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system. Report prepared by Oak Ridge National Laboratory, Submitted to Energy Efficiency and Renewable Energy Freedom Car and vehicle Technologies, May 2006.
- ORTUZAR 07 ORTUZAR (M.), MORENO (J.), DIXON (J.). Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: implementation and evaluation. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, August 2007, vol. 54, no. 4, pp. 2147-2156.
- PAY 03 PAY (S.), BAGHZOUZ (Y.). Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles. *IEEE PowerTech Conference*, June 2003, Bologna, Italy.
- PAYMAN 07 PAYMAN (A.), PIERFEDERICI (S.), MEIBODY-TABAR (F.). Performance investigation and comparison of two different electrical hybrid system structures. *IEEE-VPPC'07*, September 2007, Arlington, USA.

- PEREIRA 00 PEREIRA (G.), BARTHOLOMEUS (P.), LE MOIGNE (P.), ROMBAUT (C.), VAN BERTEN (P.). Structures de conversion d'énergie d'un engin urbain à supercondensateurs. *EPF'00*, Décembre 2000, Lille, France, pp. 225-230.
- POOL 06 POOL (R.). The sweetest solution. *IEEE trans. on Power Engineer*, April-May 2006, vol. 20, no. 2, pp. 12-17.
- RAEL 02 RAEL (S.), DAVAT (B.), BELHACHEMI (F.). *Supercondensateurs à double couche électrique : principe et fonctionnement et comportement électrique*. Journées électroniques du club EEA, 29-31 Mai 2002, Perpignan, France. ISBN 2-909968-10-3. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.satie.ens-cachan.fr>> (consulté le 05.09.08)
- RAFIK 06 RAFIK (F.), GUALOUS (H.), GALLAY(A.), CRAUSAZi (A.), BERTHON (A.). Supercapacitors characterization for hybrid vehicle applications. *IPEMC'06*, 14-16 August, Shanghai, China. [on line]. Available on: <<http://www.he-arc.ch>> (consulted the 02.03.10).
- RENAULT 10 RENAULT. Focus Better Place. [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.renault.com>> (consulté le 02.03.10)
- RIZOUG 06 RIZOUG (N.). *Modélisation électrique et énergétiques des supercondensateurs et méthodes de caractérisation : application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance*. 201 p. Thèse de doctorat : Génie électrique : Université de Lille : 2006. [en ligne]. Disponible sur : <<http://12ep.univ-lille1.fr>> (consulté le 05.09.08).
- RIZOUG 09 RIZOUG (N.), FELD (G.), BARBEDETTE (B.). Source hybride pour le démarrage d'un véhicule. *EF'09*, Septembre 2009, Compiègne, France.
- ROBERT 04 ROBERT (J.), ALZIEU (J.). Accumulateurs. *Technique de l'ingénieur*, 2004, D 3 352.
- ROBY 06 ROBY (F.). *Vers la voiture sans pétrole*. EDP sciences, 2006, 276p. (Bulles de France). ISBN : 2-86883-874-X.
- RUFER 04 RUFER (A.), HOTELLIER (D.), BARRADE (P.). A supercapacitor based energy-storage storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. *IEEE trans. on Power Delivery*, April 2004, vol. 19, no. 2, pp. 629-636.
- RUFER 99 RUFER (A.), RAVOKATRASOLOFO (H.). Static converter for complementary energy storage with battery and supercapacitor. *PCIM'99*, June 1999, Nuremberg, Germany.

- SALMASI 07 SALMASI (F. R.). Control strategies for Hybrid Electric Vehicles: evolution, classification, comparison and future trends. *IEEE trans. on Vehicular Technology*, September 2007, vol. 56, no. 3, pp. 2393-2404.
- SERRAO 05 SERRAO (L.), CHEHAB (Z.). An aging model of Ni-MH Batteries for hybrid electric vehicles. *IEEE-VPPC'05*, September 2005, Chicago, USA.
- STEINER 07 STEINER (M.), SCHOLTEN (J.). Energy storage on-board railway vehicles. *EPE'07*, September 2007, Aalborg, Denmark.
- THELE 08 THELE (M.), BOHLEN (O.), SAUER (U.), KARDEN (E.). Development of a voltage behaviour model for Ni-mH batteries using an impedance-based modeling concept. *Journal of Power Sources*, 2008, vol. 175, pp. 635-643.
- THOUNTHONG 07 THOUNTHONG (P.), RAEL (S.), DAVAT (B.). Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system. *IEEE trans. on Industrial Electronics*, December 2007, vol. 54, no. 6, pp. 3225-3233.
- THOUNTHONG 09 THOUNTHONG (P.), PANARIT (S.), RAEL (S.), DAVAT (B.). Control of fuel cell / battery / supercondensateur hybrid source for vehicle applications. *IEEE-ICIT'09*, February 2009, Gippsland, Australia.
- TRIGUI 03 TRIGUI (R.), BADIN (F.), JEANNERET (B.), HAREL (F.), COQUERY (G.), LALLEMAND (R.), OUSTEN (J.-P.), CATAGNE (M.), DEBEST(M.), GITTARD (E.), VANGRAEFSHEPE (F.), MOREL (V.), BAGHLI (L.), REZZOUG (A.), LABBE (J.), BISCAGLIA (S.). Hybrid light duty vehicles evaluation program. *International Journal of Automotive Technology*, June 2003, vol. 4, no. 2, pp. 65-75.
- TRIGUI 09 TRIGUI (R.). Les technologies hybrides et la réduction des émissions de CO₂. *Revue Transport Environnement Circulation*, Décembre 2009, n° 204, pp. 26-31.
- VERHILLE 07 VERHILLE (J-N.). *Représentation énergétique macroscopique du métro val 206 et structures de commande déduites par inversion*. Thèse de doctorat : Automatique : Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Lille : 2007.
- VINOT 08 VINOT (E.), SCORDIA (J.), TRIGUI (R.), JEANNERET (B.). Model simulation, validation and case study of the 2004 THS of Toyota Prius. *Journal vehicle Systems Modelling and Testing*, November 2008, vol. 3, no. 3.
- VINOT 10 VINOT (E.), TRIGUI (R.), JEANNERET (B.). Optimal management of electrical vehicles with a hybrid storage system. *IEEE-VPPC'10*, September 2010, Lille, France.

- VOELCKER 09 VOELCKER (J.). How green is my plug-in? *IEEE Spectrum*, Mars 2009, vol. 46, no. 3, pp.42-58.
- WATERLAIN 06 WATERLAIN (S.), GUVEN (A.), GALOUS (H.), FAUVARQUE (J. F.), GAL-LAY (R.). Hybrid power source with batteries and supercapacitor for vehicle applications. *ESCAP'06*, 2006, Lausanne, Switzerland.
- WORLD 10 WORLD RESOURCES INTITUTE. [on line]. Available on: <<http://www.wri.org>> (consulted the 02.03.10).
- WU 06 WU (Y.), GAO (H.). Optimization of fuel cell and supercapacitor for fuel-cell electric vehicles. *IEEE trans. on Vehicular Technology*, November 2006, vol. 55, no. 6, pp. 1748-1755.
- ZHANG 08 ZHANG (Y.), JIANG (Z.), YU (X.). Control strategies for battery / supercapacitor hybrid energy storage systems. *IEEE Energy2030*, November 2008, Atlanta, USA.
- ZUBIETA 98 ZUBIETA (L.), BONERT (R.). Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE-IAS'98*, 1998, pp. 1149-1154.

Méthodologies de modélisation et de gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides

ALLEGRE Anne-Laure

Doctorat de l'Université Lille1, Sciences et Technologies

Résumé

Les véhicules thermiques conventionnels se trouvent dans une situation critique due à leur forte dépendance vis-à-vis du pétrole, leur contribution à l'accroissement de l'effet de serre et à l'augmentation de la pollution atmosphérique. Le transport du futur devra donc à la fois concilier diversification énergétique, maîtrise des émissions de CO₂ et maîtrise des émissions polluantes.

Les solutions Véhicules Electriques (VEs) et Véhicules Electriques Hybrides (VEHs) nécessitent de stocker à bord du véhicule de l'énergie électrique. Pour les véhicules existants sur le marché automobile, le stockage se fait principalement par batteries et pose un certain nombre de problèmes : autonomie, durée de vie, poids... Un moyen pour répondre à ces problématiques consiste à associer deux Systèmes de Stockages d'Énergie (SSE) électriques, choisis de façon à présenter des caractéristiques complémentaires. L'objectif de la thèse vise à proposer une méthodologie d'étude des associations de SSE électriques pour VEs et VEHs, de façon à en déduire des règles de modélisation, de commande et de dimensionnement.

Une architecture et une Représentation Énergétique Macroscopique (REM) générales, capable de décrire l'ensemble des VEs mixtes utilisant deux SSE électriques, sont établies. La REM générale permet de mieux analyser le système et de simuler l'ensemble des architectures avec un seul et même programme. L'architecture générale permet de tester différentes architectures sur un même banc expérimental. Cette REM est étendue à des VEHs utilisant deux SSE électriques et à des VEs mixtes utilisant trois SSE électriques. La méthodologie de modélisation est appliquée, en particulier, à deux VEs mixtes ayant des architectures différentes, une voiture électrique mixte et un microbus électrique mixte, puis étendue à un VEH mixte de type série et un métro électrique mixte utilisant trois SSE électriques. Les SSE électriques utilisés sont constitués de batteries et de supercondensateurs.

Les structures de commande de chaque véhicule présenté sont élaborées. Elles ont été validées par simulation et par expérimentation en utilisant des stratégies simples de gestion d'énergie. En particulier, la structure de commande de la voiture électrique mixte a été validée expérimentalement en utilisant une simulation « Hardware-in-the-Loop » (HIL) à échelle réduite, et celle du microbus électrique sur un véhicule réel. Différentes stratégies de gestion de l'énergie ont été développées pour la voiture électrique mixte batteries / supercondensateurs. Une étude montre l'influence de ces stratégies notamment sur la consommation de l'énergie électrique de la batterie, sa durée de vie et son dimensionnement.