

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER - BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE



# *Thèse de Doctorat*

*En vue de l'obtention du diplôme de doctorat en sciences en génie électrique*

## *Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources*

Réalisé par: **Messaoud MOHAMMEDI**

Soutenue publiquement le: 10 Juillet 2016

**Devant le jury composé de:**

Ammar MOUSSI	Professeur	Université de Biskra	Président
Abdennacer ABOUBOU	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
Mohamed BECHERIF	Maître de conférences	UTBM, France	Co-rapporteur
Abdelkarim ALLAG	Professeur	Université d'Eloued	Examinateur
Djilali BENATTOUS	Professeur	Université d'Eloued	Examinateur
Ahmed OUARI	Professeur	Université de Annaba	Examinateur
Boualaga RABHI	Maître de conférences	Université de Biskra	Examinateur

*Année Universitaire 2015/2016*

# *Dédicace*



*ma grand-mère,  
mes chers parents,  
ma femme et mes enfants,  
mes frères et sœurs,  
mes enseignants et mes chers amis,*

*je dédie ce modeste travail.*

# Remerciements



Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

J'adresse tout d'abord mes sincères remerciements à Monsieur *Abdennacer ABOUBOU* mon directeur de thèse, Professeur à l'Université de Biskra et à Monsieur *Mohamed BECHERIF* mon co-directeur de thèse, Maître de conférences (HDR) à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (France) pour la confiance qu'ils m'ont témoignée. Leur expérience de recherche, leurs conseils, leurs encouragements qui m'ont été très précieux et m'ont permis de bien mener mon travail.

J'ai été profondément honoré que Monsieur *Ammar MOUSSI*, Professeur à l'Université de Biskra, ait accepté d'examiner ce travail et de présider ce jury.

J'exprime également mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse:

- Messieurs *Abdelkarim ALLAG* et *Djilali BENATTOUS*, Professeurs à l'Université d'Eloued.
- Monsieur *Ahmed OUARI*, Professeur à l'Université de Annaba.
- Monsieur *Boualaga RABHI*, Maître de conférences à l'Université de Biskra.

Je tiens à remercier mon ami *Mohamed Yacine HAMMOUDI* pour les moments que nous avons passés ensemble durant la rédaction de nos thèses.

Je tiens aussi à remercier mes collègues du laboratoire LMSE et du département de génie électrique pour leur soutien durant toutes ces années.

es piles à combustible (*FCs*) sont une bonne alternative pour l'utilisation de l'énergie propre dans la plupart des applications résidentielles et industrielles. Cependant, elles sont caractérisées par une dynamique lente et la difficulté à répondre aux changements brusques des charges. Ceci a conduit à souvent les associer à une ou plusieurs sources de puissance à dynamique rapide, telles que les supercondensateurs (*SCs*) ou les batteries. Dans ce manuscrit, nous étudions différents systèmes hybrides (*FC/SC*, *FC/Batterie* et *FC/Batterie/SC*) utilisant un *FC* en tant que source principale, un bus continu, des supercondensateurs et/ou batteries comme des sources d'alimentation auxiliaires. Ces systèmes sont modélisés par des équations dans l'espace d'état. La gestion de l'énergie est effectuée par l'utilisation d'un contrôleur flou (*FLC*) pour déterminer les courants de références désirés des supercondensateurs et/ou la batterie. Les systèmes seront commandés par un contrôleur basé sur la passivité. Ce contrôleur a pour but de forcer les courants de suivre leurs références. La commande basée sur la passivité (*PBC*) est une technique non linéaire très puissante, qui traite des informations importantes des systèmes telles que l'énergie totale. La preuve de stabilité et les résultats de simulation sont donnés.

**Mots Clés:** Pile à combustible, Batterie, Supercondensateurs, Commande basée sur la passivité, Assignation de l'interconnexion et de l'amortissement, Système Hamiltonien commandé par ports, Logique floue, Système hybride.



Fuel Cells (*FCs*) are a good alternative for using clean energy in most of residential and industrial applications. Therefore, their slow dynamics and difficulty to respond to the abrupt changes of load leads to prefer the association of a FC with one or more power sources of high dynamics, such as supercapacitors (*SCs*) or batteries. In this manuscript, we study a different hybrid power sources systems (*FC/SC*, *FC/Battery* and *FC/Battery/SC*) using *FC* as a main source, a DC link, supercapacitors and/or batteries as an auxiliary power sources. The whole systems are modelled in state space equations. The energy management is reached by using a Fuzzy Logic Control (*FLC*) to determine the desired reference currents of supercapacitors and/or batteries. The systems will be controlled by a controller based on passivity. This controller is designed to force the currents to track their references. Passivity-Based Control (*PBC*) is a very powerful nonlinear technique dealing with important system information like the system's total energy. Stability proof and simulation results are given.

**Key words:** Fuel cell, Batteries, Supercapacitors, Passivity-Based Control, Interconnection and damping assignment, Port Controlled Hamiltonian System, Fuzzy Logic System, Hybrid System.

# Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources

Messaoud MOHAMMEDI

October 24, 2016

# Table des Matières

<i>Introduction Générale</i>	<b>1</b>
<b>1</b> <i>État de l'Art sur : les Véhicules Hybrides et la Gestion de l'Énergie</i>	<b>6</b>
1.1 Introduction . . . . .	7
1.2 Différentes configurations des véhicules hybrides . . . . .	7
1.2.1 Véhicules électriques . . . . .	7
1.2.2 Véhicules hybrides à pile à combustible . . . . .	8
1.2.3 Véhicules électriques hybrides . . . . .	8
1.2.4 Degrés d'hybridation des véhicules électriques hybrides . . . . .	10
1.3 Stratégies de la gestion de l'énergie . . . . .	11
1.3.1 Stratégies On/Off-line . . . . .	11
1.3.2 Stratégies à base Optimisation/Règles . . . . .	15
1.4 Stabilités des systèmes non linéaires . . . . .	16
1.4.1 Stabilité au sens de Lyapunov . . . . .	16
1.4.2 Fonction de Lyapunov quadratique . . . . .	18
1.4.3 Fonction de Lyapunov non quadratique . . . . .	19
1.5 Conclusion . . . . .	20
<b>2</b> <i>Description, Modélisation et Hybridation des Sources : Pile à Combustible, Batterie et Supercondensateur</i>	<b>21</b>
2.1 Introduction . . . . .	22
2.2 Pile à combustible . . . . .	22
2.2.1 Principe de fonctionnement . . . . .	22
2.2.2 Types de piles à combustible . . . . .	24
2.2.3 Pile à combustible de type PEM . . . . .	25
2.3 Éléments de stockage de l'énergie électrique . . . . .	28
2.3.1 Batteries . . . . .	29
2.3.2 Supercondensateurs . . . . .	31

2.4	Structure d'un système électrique hybride . . . . .	35
2.5	Association batterie/supercondensateur . . . . .	36
2.5.1	Topologie en cascade avec un convertisseur DC/DC . . . . .	36
2.5.2	Topologie en cascade avec deux convertisseurs DC/DC . . . . .	37
2.5.3	Topologie parallèle avec deux convertisseurs DC/DC . . . . .	37
2.6	Hybridation de FC/SC . . . . .	38
2.6.1	Équations du système . . . . .	39
2.7	Hybridation de FC/Batterie . . . . .	44
2.8	Hybridation de Batterie/SC . . . . .	46
2.9	Hybridation de FC/Batterie/SC . . . . .	48
2.10	Conclusion . . . . .	51
<b>3</b>	<b><i>Représentation Hamiltonienne par Ports et Commande par Passivité</i></b>	<b>52</b>
3.1	Introduction . . . . .	53
3.2	Équations d'Euler-Lagrange . . . . .	53
3.3	Vers la représentation par ports des systèmes hamiltoniens . . . . .	54
3.3.1	Exemple démonstratif : système masse-ressort . . . . .	54
3.3.2	Structure de Dirac . . . . .	57
3.4	Systèmes dissipatifs et passifs . . . . .	62
3.5	Commande basée sur la passivité des systèmes hamiltoniens représentés par ports . . . . .	63
3.5.1	Passivité standard et balance d'énergie . . . . .	65
3.5.2	Commande par injection d'amortissements . . . . .	66
3.5.3	Commande par interconnexion . . . . .	67
3.5.4	Assignment d'interconnexion et d'amortissement IDA-PBC . . . . .	68
3.6	Conclusion . . . . .	70
<b>4</b>	<b><i>Gestion de l'Énergie des Sources Hybrides par Logique Floue et PBC</i></b>	<b>71</b>
4.1	Introduction . . . . .	72
4.2	Contrôle par la logique floue . . . . .	72
4.2.1	Interface de fuzzification . . . . .	72
4.2.2	Base de règles du système . . . . .	73
4.2.3	Machine d'inférence floue . . . . .	73

4.2.4	Interface de défuzzification . . . . .	73
4.3	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/SC sans filtre . . . . .	74
4.3.1	Fonction d'énergie . . . . .	75
4.3.2	Représentation PCH du système bouclé . . . . .	76
4.3.3	Loi de commande de IDA-PBC . . . . .	77
4.3.4	Résultats de simulation . . . . .	79
4.4	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/SC avec filtre . . . . .	84
4.4.1	Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC . . . . .	85
4.4.2	Résultats de Simulation . . . . .	87
4.5	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/Batterie . . . . .	92
4.5.1	Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC . . . . .	94
4.5.2	Résultats de Simulation . . . . .	96
4.6	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/Batterie/SC . . . . .	100
4.6.1	Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC . . . . .	101
4.6.2	Résultats de simulation . . . . .	104
4.7	Conclusion . . . . .	116

# Liste des Figures

1.1	Architecture hybride série . . . . .	9
1.2	Architecture hybride parallèle . . . . .	10
1.3	Architecture hybride mixte . . . . .	10
1.4	Gestion d'énergie des <i>VEH</i> par contrôleur flou . . . . .	12
1.5	Projection du plan de Ragone sur un axe fréquentiel [Akl08]. . . . .	15
1.6	Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie . . . . .	17
2.1	Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie . . . . .	23
2.2	Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEMFC [Fer09] . . . . .	24
2.3	Caractéristique statique V-I simulée et mesurée d'une pile à combustible PEM NEXA 1.2 kW . . . . .	28
2.4	Schéma électrique équivalent d'un élément de batterie. . . . .	29
2.5	Différentes technologies de condensateurs . . . . .	32
2.6	Schémas électriques équivalents d'un supercondensateur [Can02, Mak08] . . . . .	33
2.7	Structure générale d'un système électrique hybride [Pai10] . . . . .	35
2.8	Convertisseurs DC/DC en cascade, batterie du côté bus continu . . . . .	37
2.9	Convertisseurs DC/DC en cascade, supercondensateur du côté bus continu . . . . .	37
2.10	Architecture série avec deux convertisseurs DC/DC . . . . .	38
2.11	Architecture parallèle avec deux convertisseurs DC/DC . . . . .	38
2.12	Structure de la source hybride FC/SC sans filtre . . . . .	39
2.13	Schémas équivalents du convertisseur boost du FC . . . . .	40
2.14	Schémas équivalents du convertisseur buck-boost du SC . . . . .	41
2.15	Structure de la source hybride FC/SC avec filtre . . . . .	43
2.16	Structure de la source hybride FC/Batterie . . . . .	46
2.17	Structure de la source hybride Batterie/SC . . . . .	47
2.18	Structure de la source hybride FC/Batterie/SC . . . . .	49
3.1	Système masse-ressort . . . . .	55

3.2	Système hamiltonien représenté par ports . . . . .	56
3.3	Entraînement d'un moteur à courant continu . . . . .	60
3.4	Contrôle par interconnexions d'un système <i>PH</i> par un contrôleur de structure <i>PH</i> . . . . .	67
4.1	Schéma explicatif de la logique floue . . . . .	73
4.2	Structure globale de la commande du système hybride . . . . .	75
4.3	Changement de la résistance de la charge. . . . .	81
4.4	(a) Tension du bus continu et sa référence (b) Courant de la charge . . . . .	81
4.5	(a) Tension du <i>FC</i> . (b) Courant du <i>FC</i> . . . . .	82
4.6	(a) Tension du <i>SC</i> . (b) Courant du <i>SC</i> et sa référence . . . . .	82
4.7	(a) Commande du convertisseur Boost du <i>FC</i> (b) Commande du convertisseur Buck-Boost du <i>SC</i> . . . . .	83
4.8	(a) $QH_2$ du <i>FC</i> . (b) <i>SoC</i> du Supercondensateur . . . . .	83
4.9	Transfert de puissances . . . . .	84
4.10	(a) Tension du bus continu et sa référence (b) Courant de la charge . . . . .	89
4.11	(a) Tension du <i>FC</i> . (b) Courant du <i>FC</i> . . . . .	89
4.12	(a) Tension du <i>SC</i> . (b) Courant du <i>SC</i> et sa référence. . . . .	90
4.13	(a) Commande du convertisseur Boost du <i>FC</i> (b) Commande du convertisseur Buck-Boost du <i>SC</i> . . . . .	90
4.14	(a) $QH_2$ du <i>FC</i> . (b) <i>SoC</i> du Supercondensateur . . . . .	91
4.15	Transfert de puissances . . . . .	91
4.16	(a) Tension du bus continu et sa référence (b) Courant de la charge (c) Changement de la charge . . . . .	92
4.17	(a) Tension du bus continu et sa référence (b) Courant de la charge . . . . .	97
4.18	(a) Tension du <i>FC</i> . (b) Courant du <i>FC</i> . . . . .	97
4.19	(a) Tension de la batterie (b) Courant de la batterie et sa référence . . . . .	98
4.20	(a) Commande du convertisseur Boost du <i>FC</i> (b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie . . . . .	98
4.21	(a) $QH_2$ du <i>FC</i> . (b) <i>SoC</i> de la batterie . . . . .	99
4.22	Transfert de puissances . . . . .	99
4.23	(a) Tension du bus continu et sa référence (b) Courant de la charge . . . . .	106
4.24	(a) Tension du <i>FC</i> . (b) Courant du <i>FC</i> . . . . .	107

4.25	(a) Tension de la batterie (b) Courant de la batterie et sa référence . . . . .	107
4.26	(a) Tension de SC. (b) Courant de SC et sa référence . . . . .	108
4.27	(a) Commande du convertisseur Boost du <i>FC</i> (b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie (c) Commande du convertisseur Buck-Boost du SC . . . . .	108
4.28	(a) $QH_2$ du <i>FC</i> . (b) <i>SoC</i> du <i>SC</i> (c) <i>SoC</i> de la batterie . . . . .	109
4.29	Transfert de puissances . . . . .	109
4.30	Changement de la force électromotrice de la charge . . . . .	110
4.31	Tension du bus continu et sa référence Courant de la charge . . . . .	112
4.32	(a) Tension du <i>FC</i> . (b) Courant du <i>FC</i> . . . . .	113
4.33	(a) Tension de la batterie (b) Courant de la batterie et sa référence . . . . .	113
4.34	(a) Tension de SC. (b) Courant de SC et sa référence . . . . .	114
4.35	(a) Commande du convertisseur Boost du <i>FC</i> (b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie (c) Commande du convertisseur Buck-Boost du SC . . . . .	114
4.36	(a) $QH_2$ du <i>FC</i> . (b) <i>SoC</i> du <i>SC</i> (c) <i>SoC</i> de la batterie . . . . .	115
4.37	Transfert de puissances . . . . .	115

# Liste des Tableaux

2.1	Différents types de piles à combustible [Han08, Lac04, SNCH <sup>+</sup> 00] . . . . .	25
2.2	Matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques [Pai10]	31
2.3	Les différents types de supercondensateurs [Can02] . . . . .	32
4.1	Différents paramètres de simulation de la source hybride FC/SC sans filtre [ABH <sup>+</sup> 10] . . . . .	79
4.2	La base des règles de la logique floue . . . . .	80
4.3	Différents paramètres de simulation de la source hybride FC/SC avec filtre [ABH <sup>+</sup> 10] . . . . .	87
4.4	La base des règles de la logique floue . . . . .	88
4.5	Différents paramètres de simulation de la source hybride FC/Batterie [ABP <sup>+</sup> 07], [ABH <sup>+</sup> 10] . . . . .	96
4.6	La base des règles de la logique floue . . . . .	96
4.7	La base des règles de la logique floue de la sources hybride FC/SC/Batterie ( $QH_2$ , $SoC_{SC}$ et $SoC_B$ entrées du $FLC$ et $\bar{I}_{SC}$ , $\bar{I}_B$ sorties) . . . . .	105
4.8	La base des règles de la logique floue de la sources hybride FC/SC/Batterie ( $QH_2$ , $SoC_B$ et $I_L$ entrées du $FLC$ et $\bar{I}_B$ sortie) . . . . .	111

# Nomenclature

## Acronyme

---

<i>AFC</i>	<i>Alkaline Electrolyte Fuel Cell</i>
<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>Dioxyde de carbone</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>DMFC</i>	<i>Direct Methanol Fuel Cell</i>
<i>DoD</i>	<i>Depth of Discharge</i>
<i>EDP</i>	<i>Équations aux Dérivées Partielles</i>
<i>FC</i>	<i>Fuel Cell</i>
<i>IDA</i>	<i>Interconnection and Damping Assignment</i>
<i>MCFC</i>	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
<i>MCI</i>	<i>Moteur á Combustion Interne</i>
<i>PAFC</i>	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
<i>PBC</i>	<i>Passivity-Based Control</i>
<i>PCH</i>	<i>Port Controlled Hamiltonian</i>
<i>PEMFC</i>	<i>Protons Exchange Membrane Fuel Cell</i>
<i>PHS</i>	<i>Port Hamiltonian System (Système PH)</i>
<i>QH<sub>2</sub></i>	<i>Quantité d'Hydrogène</i>
<i>SC</i>	<i>Supercondensateur</i>
<i>SCM</i>	<i>Stiffness Coefficient Model</i>
<i>SH</i>	<i>Système Hybride</i>
<i>SMES</i>	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
<i>SoC</i>	<i>State of Charge</i>
<i>SoH</i>	<i>State of Health</i>
<i>SOFC</i>	<i>Solid Oxyde Fuel Cell</i>

$SSE$	<i>Système de Stockage d'Énergie</i>
$VE$	<i>Véhicule Électrique</i>
$VEH$	<i>Véhicule Électrique Hybride</i>
$VH$	<i>Véhicule Hybride</i>

## Symboles

<b><i>Symbole</i></b>	<b><i>Description</i></b>
$C_{DL}$	<i>Capacité du bus continu</i>
$C_S$	<i>Capacité de sortie de l'ensemble pile/convertisseur</i>
$C_{SC}$	<i>Capacité du supercondensateurs</i>
$\Delta I_{FCmax}$	<i>Ondulation maximale du courant de la pile à combustible</i>
$\Delta V_{DLmax}$	<i>Ondulation maximale de la tension du bus continu</i>
$e_B$	<i>Force électromotrice de la batterie</i>
$E_L$	<i>Force électromotrice de la charge</i>
$f_d$	<i>Fréquence de découpage du convertisseurs</i>
$V_B$	<i>Tension de la batterie</i>
$V_d$	<i>Tension de référence du bus continu</i>
$V_{DL}$	<i>Tension du bus continu</i>
$V_{FC}$	<i>Tension de la pile à combustible</i>
$V_S$	<i>Tension de sortie de l'ensemble pile/convertisseur</i>
$V_{SC}$	<i>Tension du supercondensateurs</i>
$I_B$	<i>Courant de la batterie</i>
$I_{FC}$	<i>Courant de la pile à combustible</i>
$I_{SC}$	<i>Courant du supercondensateurs</i>
$L_B$	<i>Inductance de la batterie</i>
$L_{DL}$	<i>Inductance du bus continu</i>
$L_{FC}$	<i>Inductance de la pile à combustible</i>

$L_L$	<i>Inductance de la charge</i>
$L_{SC}$	<i>Inductance du supercondensateurs</i>
$r$	<i>Paramètre de réglage de la matrice d'amortissements</i>
$R_B$	<i>Résistance interne de la batterie</i>
$R_L$	<i>Résistance de la charge</i>
$U_B, U_{FC}, U_{FC}$	<i>Signaux de commande des convertisseurs</i>
$C$	<i>Fonction de Casimir</i>
$\mathcal{D}$	<i>Structure de Dirac</i>
$e$	<i>Vecteur des efforts</i>
$f$	<i>Vecteur des flux</i>
$\mathcal{F}$	<i>Espace des variables de flux</i>
$\mathcal{F}^* := \mathcal{E}$	<i>Espace des variables d'effort</i>
$H$	<i>Fonction d'énergie naturelle du système (Hamiltonien)</i>
$\nabla H_d$	<i>Gradient de la fonction d'énergie</i>
$(\cdot)_d$	<i>Variable désirée</i>
$\mathcal{L}$	<i>Lagrangien</i>
$x$	<i>Vecteur d'état</i>
$x_d$	<i>Vecteur d'état désiré</i>
$\bar{x}, x_*$	<i>États d'équilibres</i>
$\tilde{x}$	<i>Variable d'erreur</i>
$u, v$	<i>Vecteurs d'entrée</i>
$y, Y$	<i>Vecteurs de sortie</i>
$\mathcal{J}$	<i>Matrice d'interconnexions</i>
$\mathcal{R}$	<i>Matrice d'amortissements</i>
$diag\{.\}$	<i>Matrice diagonale</i>

# *Introduction Générale*

## **Contexte du travail**

La consommation de l'énergie au niveau mondiale est liée étroitement à la population. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays en voie de développement ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'exploitation excessive des ressources fossiles pour satisfaire ces besoins est le responsable majeur des rejets des gaz polluants; dont la pollution est à l'origine du réchauffement de la planète et des bouleversements climatiques. Actuellement, le secteur des transports est à l'origine, presque du tiers des émissions mondiales de  $CO_2$ .

Les énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles pour leur faible impact sur l'environnement. Malheureusement, jusqu'à maintenant, les puissances installées par les énergies renouvelables ne sont pas capables de concurrencer les grandes centrales actuelles à cause de leur intermittence et leur caractère fluctuant. Alors, il est indispensable d'utiliser des moyens de stockage pour assurer la continuité d'approvisionnement de l'énergie. Ces sources d'énergies renouvelables et les moyens de stockage associés constituent ainsi un système hybride.

Dans le secteur de l'automobile, les constructeurs s'orientent vers l'amélioration des moteurs thermiques et l'hybridation avec des moteurs électriques pour minimiser le taux d'émission du  $CO_2$  [TJMP09]. Cette voie consiste à développer ces solutions hybrides couplant les moteurs thermiques classiques à des moteurs électriques. Il existe différentes architectures de ce véhicule selon la disposition des deux moteurs : architecture série, architecture parallèle et architecture série-parallèle.

Une alternative plus ambitieuse consiste à se passer du moteur thermique et construire ainsi des véhicules dits tout électriques fonctionnant exclusivement avec un (ou plusieurs) moteur(s) électrique(s), pour la propulsion dite zéro émission. Ce type de véhicules n'a pas connu les progrès attendus à cause de leur faible autonomie, leur temps de charge

---

important et leur coût élevé. Une solution possible pour surmonter ce problème est d'utiliser une source d'énergie propre et suffisante pour assurer la propulsion du véhicule. À cette fin, une pile à combustible peut être utilisée (Fuel Cell (FC)).

La pile à combustible est un élément électrochimique permettant de convertir l'énergie de l'hydrogène en électricité. Son carburant, l'hydrogène, n'est pas disponible à l'état naturel, il s'agit d'un vecteur énergétique qui peut être produit à partir de différentes sources d'énergies. Un nouvel challenge doit être affronté: Comment produire de l'hydrogène d'une façon propre? Actuellement, la plus grande part de l'hydrogène (environ 95%) est produite à partir de combustibles fossiles comme le gaz naturel et le charbon [CGB10], mais il est possible de le produire par des sources d'énergie renouvelables telles que l'électrolyse solaire, l'électrolyse éolienne etc ... [www13, CFMS13].

La propulsion dans les véhicules électriques à pile à combustible est intégralement assurée par un ou plusieurs moteurs électriques. Elle n'engendre donc aucune pollution atmosphérique locale, ni bruit et avec une grande autonomie. Malgré leurs avantages, les piles à combustible ne sont pas une source électrique idéale. En effet, elles ont un temps de réponse lent (la dynamique lente des auxiliaires) et ne sont pas réversibles en puissance. Ces deux caractéristiques ne leur permettent pas de répondre directement aux exigences des dynamiques des véhicules. Donc, elles sont souvent hybridées avec un système de stockage d'énergie (*SSE*) qui contient une ou plusieurs sources d'énergie auxiliaires permettant d'effectuer les opérations de démarrage et de récupérer l'énergie lors des freinages [XWW14, THNCB10]. Les batteries et les supercondensateurs (SCs) sont les technologies les plus couramment utilisées à bord des véhicules électriques hybrides. La combinaison de ces sources forme un système hybride (*SH*) de manière à profiter des avantages de chacune d'elles.

Les volants d'inertie à grande vitesse sont une technologie émergente avec des caractéristiques ayant le potentiel de les rendre compétitifs avec les technologies de la batterie et des supercondensateurs [DM11]. Cependant, ils présentent plusieurs inconvénients dont le potentiel danger est en cas d'accident du véhicule.

L'objectif du présent travail est d'étudier les stratégies de commande et la gestion de l'énergie des systèmes hybrides ayant une pile à combustible de type PEM (*Protons Exchange Membrane*) associée à un réservoir d'hydrogène comme source primaire d'énergie et d'autres sources réversibles (Batterie et/ou supercondensateurs) comme sources aux-

---

iliaires. Il faut contrôler le flux de puissance entre les sources électriques et la charge. Ces systèmes sont dédiés à la propulsion des véhicules électriques à pile à combustible, en minimisant autant que possible la consommation d'hydrogène.

Nous souhaitons pallier les limites du FC par la conception de l'architecture d'hybridation en utilisant l'hybridation active parallèle, c'est-à-dire que chacune des sources est connectée au bus continu (*DC Link*) à travers, un hacheur élévateur (*boost*) pour le FC et un hacheur abaisseur-élévateur (*buck-boost*) pour les sources réversibles. Les degrés de liberté introduits par les hacheurs permettent de contrôler le flux de puissance entre les sources électriques et la charge; et de contrôler la tension du bus continu. Par ailleurs, l'association active parallèle offre la possibilité, aux systèmes, de fonctionner en cas de défaillance d'une des sources, ce qui augmente la fiabilité du système global.

Les supercondensateurs, ayant des caractéristiques intrinsèques complémentaires à celles du système au FC à cause de leur dynamique très rapide, sont le premier choix du stockage d'énergie. Leur principe de stockage électrostatique offre une très grande densité de puissance associée à une densité d'énergie réduite [THNCB10]. À cause de cette dernière caractéristique, les SCs ne peuvent pas couvrir les besoins des auxiliaires du FC pendant son démarrage qui nécessite environ 10 minutes [TCS+09]. Ceci conduit à utiliser une source qui a une densité d'énergie élevée. Dans ce cas, c'est les batteries qui l'emporte. Néanmoins, elles présentent, entre autres, l'inconvénient d'avoir une densité de puissance réduite et une réponse lente lors de l'accélération et du freinage du véhicule. Donc, l'hybridation des trois sources, FC, batterie et SCs est recommandée [ABP+07], [ABH11].

Les systèmes hybrides, FC/SCs, FC/Batterie et FC/Batterie/SCs, que nous allons étudier, seront modélisés par des systèmes à variables d'état. Ceux-ci ont une forte non linéarité à cause du couplage de la commande des hacheurs avec quelques états des systèmes. Ces systèmes à variables d'état seront exprimés par la représentation hamiltonienne par ports.

Le cadre des systèmes hamiltoniens représentés par ports (*PH*) ou commandés par ports (PCH: Port Controlled Hamiltonian) permet de décrire des systèmes physiques en termes de leur échange d'énergie, de l'interaction entre les éléments de base de ces systèmes et de leur environnement. Dans notre travail, nous nous intéressons uniquement aux systèmes PH avec dissipation. Leur propriété la plus importante est leur passivité.

---

La notion de passivité des systèmes dynamiques provient des phénomènes de dissipation d'énergie à travers les éléments dissipatifs (par exemple: résistances, amortisseurs etc. . .).

Les systèmes hamiltoniens représentés sont des systèmes passifs. L'intuition suggère que les systèmes passifs sont stables, mais ce n'est généralement pas suffisant, car le système pourrait être seulement marginalement stable ou stable autour d'un équilibre non désiré. L'idée de base est de contrôler le système par la soustraction ou l'ajout, artificiellement, de l'énergie au système afin d'atteindre un ensemble d'équilibres stables. Cette idée est appelée le *façonnement d'énergie* qui est assuré par la commande basée sur la passivité (*PBC*).

La commande basée sur la passivité a d'abord été utilisée pour la commande de systèmes physiques, tels que les systèmes mécaniques, électriques et électromécaniques, en particulier ceux décrits par les équations du mouvement d'Euler-Lagrange [OLNSR98].

Une approche récente et très intéressante pour résoudre ces problèmes est la Commande Basée sur la Passivité avec Assignation d'Interconnexions et d'Amortissements (IDA-PBC) [OVDSME02].

## Contributions

Nos principales contributions, dans le cadre de cette thématique, se résument dans les points suivants :

- Le contrôle du flux de puissance de la batterie, via un hacheur buck-boost qui est inséré entre la batterie et le bus continu mais avec une variable d'état de plus dans le système. Alors que dans la plupart des systèmes hybrides à trois sources FC/Batterie/SCs, la batterie est branchée directement au bus continu.
- L'utilisation d'un contrôleur flou pour générer les courants de références des moyens de stockage Batterie et/ou SCs. Leurs états de charge et la quantité d'hydrogène disponible du FC, sont les entrées de ce contrôleur. Ceci a comme avantages:
  1. Économiser de l'hydrogène par l'utilisation des moyens de stockage durant les phases permanentes au lieu de ne les utiliser que pendant les phases transitoires.
  2. Et de ce fait, éviter le sur-dimensionnement de la pile à combustible qui devient moins sollicitée. Et par conséquent, gagner en coût du véhicule.

---

## Organisation de la thèse

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'articulent autour de quatre chapitres.

Une revue bibliographique est l'objet du **premier chapitre**, où quelques problèmes liés au domaine des véhicules électriques et hybrides, plus précisément ceux dédiés à l'étude de la gestion d'énergie, sont exhibés. Nous présentons, dans un premier lieu, les technologies principales des véhicules électriques, puis les concepts d'hybridations dans les véhicules hybrides et électriques. Un état de l'art des différentes stratégies de gestion d'énergie est donné. La stabilité des systèmes non linéaire au sens de Lyapunov est étudiée, en fin de chapitre.

Le **deuxième chapitre** est consacré à l'étude de la description, la modélisation et l'hybridation des principales sources utilisées dans les systèmes hybrides dédiées au domaine du transport. Les systèmes électriques hybrides étudiés comprennent des sources d'énergie de natures différentes (pile à combustible, batterie et supercondensateur), dont les schémas et les modèles d'équations ont été détaillés.

Dans le **troisième chapitre**, la représentation hamiltonienne par ports des systèmes non linéaires, qui sera utilisée pour représenter les modèles d'équations de nos systèmes étudiés, est présentée. Ainsi que, la commande par passivité qui sera utilisée pour commander nos systèmes.

Au début du **dernier chapitre**, nous introduisons le principe du contrôleur flou, en déterminant ses entrées et sorties. Puis, nous appliquons la commande par passivité aux différents systèmes, pour assurer d'une part la régulation du bus continu et d'autre part la poursuite des courants de références des sources électriques réversibles (Batterie/SC) générés par la logique floue.

Pour clôturer ce manuscrit, une conclusion générale et d'éventuelles perspectives de recherche suite à ce travail sont données.

# *État de l'Art sur : les Véhicules Hybrides et la Gestion de l'Énergie*

---

1.1	Introduction . . . . .	7
1.2	Différentes configurations des véhicules hybrides . . . . .	7
1.2.1	Véhicules électriques . . . . .	7
1.2.2	Véhicules hybrides à pile à combustible . . . . .	8
1.2.3	Véhicules électriques hybrides . . . . .	8
1.2.4	Degrés d'hybridation des véhicules électriques hybrides . . . . .	10
1.3	Stratégies de la gestion de l'énergie . . . . .	11
1.3.1	Stratégies On/Off-line . . . . .	11
1.3.2	Stratégies à base Optimisation/Règles . . . . .	15
1.4	Stabilités des systèmes non linéaires . . . . .	16
1.4.1	Stabilité au sens de Lyapunov . . . . .	16
1.4.2	Fonction de Lyapunov quadratique . . . . .	18
1.4.3	Fonction de Lyapunov non quadratique . . . . .	19
1.5	Conclusion . . . . .	20

---

## 1.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter, d'une part, quelques rappels indispensables à la compréhension de cette thèse et, d'autre part, une synthèse bibliographique de quelques problèmes liés au domaine des véhicules électriques. Plus précisément, ceux concernant la gestion de l'énergie.

Nous présentons, dans un premier lieu, les technologies principales des véhicules électriques et les concepts d'hybridations des sources pour les véhicules. Ensuite, on va mettre l'accent sur les différentes stratégies de la gestion de l'énergie.

## 1.2 Différentes configurations des véhicules hybrides

Dans un véhicule traditionnel, le moteur à combustion interne (*MCI*) fournit la puissance de propulsion du véhicule. Une boîte de vitesses est utilisée car les caractéristiques de vitesse et de couple d'un *MCI* ne correspondent pas toujours aux exigences au niveau des roues. Cette structure est devenue systématiquement une méthode approuvée, même si le moteur est utilisé loin des points de fonctionnement préférés. Pour surmonter ce problème, une installation d'une autre source d'énergie qui correspond mieux aux exigences de puissance de la charge est une solution efficace. Il est également possible de garder le *MCI* traditionnel installé et ajouter une source d'énergie secondaire pour couvrir la demande totale de puissance. Selon ce raisonnement, trois concepts différents sont discutés ci-dessous : les véhicules électriques, les véhicules hybrides à pile à combustible et les véhicules électriques hybrides.

### 1.2.1 Véhicules électriques

Deux éléments essentiels dans un véhicule électrique (*VE*), une batterie qui joue le rôle d'une source d'énergie primaire et un moteur électrique qui assure la propulsion du véhicule. On note ici, que la batterie doit être chargée à partir d'un dispositif externe pour garantir le fonctionnement du *VE*. Dans de nombreux cas, la recharge de batterie s'effectue à partir du réseau électrique. Généralement, ce type de *VE* appelé véhicule "plug-in" [JZW10, Kes07].

## 1.2.2 Véhicules hybrides à pile à combustible

Un véhicule hybride à pile à combustible se classe dans la catégorie des véhicules à architecture d'hybridation série [Han08]. De point de vue mécanique, il n'y a pas de différence entre le système de propulsion d'un véhicule hybride à pile à combustible et un *VE*. Les deux véhicules fournissent la puissance aux roues uniquement par le moteur électrique. Cependant, le système d'alimentation en énergie électrique est différent. En plus de la batterie, une pile à combustible représente une source principale pour fournir de l'énergie électrique. La pile à combustible génère de l'énergie électrique à partir de l'hydrogène ( $H_2$ ) stocké dans le réservoir du carburant, et par la suite, la batterie sera rechargée par cette dernière [Kes07].

On note qu'il y a une différence entre un véhicule hybride à pile à combustible et un véhicule à *MCI* à hydrogène. Ce dernier ressemble à une configuration traditionnelle du véhicule, mais le moteur a été modifié pour fonctionner à l'hydrogène pur [WE05].

## 1.2.3 Véhicules électriques hybrides

Un véhicule électrique hybride (*VEH*) combine un *MCI* et une machine électrique dans son système de propulsion. Dans la littérature, il existe principalement trois classes : *VEH* série, parallèle et série/parallèle.

### 1.2.3.1 Architecture hybride série

Le système hybride série se compose d'un moteur à combustion, un générateur, deux convertisseurs, un élément de stockage d'énergie (par exemple une batterie ou condensateur) et un moteur de traction, comme le montre la figure (1.1). Dans le système hybride série le moteur à combustion n'est pas couplé mécaniquement à l'engrenage final, ce qui permet de le faire fonctionner à une efficacité optimale indépendante de la charge routière. Le dimensionnement de la batterie joue un rôle important pour contrôler le moteur à combustion. Si une grande batterie est utilisée, le moteur à combustion peut fonctionner de façon plus indépendante de la charge, car la batterie joue le rôle d'accumulateur d'énergie qui est utilisée pour des demandes de puissance transitoires [Nor05, He06].

Certains avantages et inconvénients du système hybride série sont donnés ci-dessous :

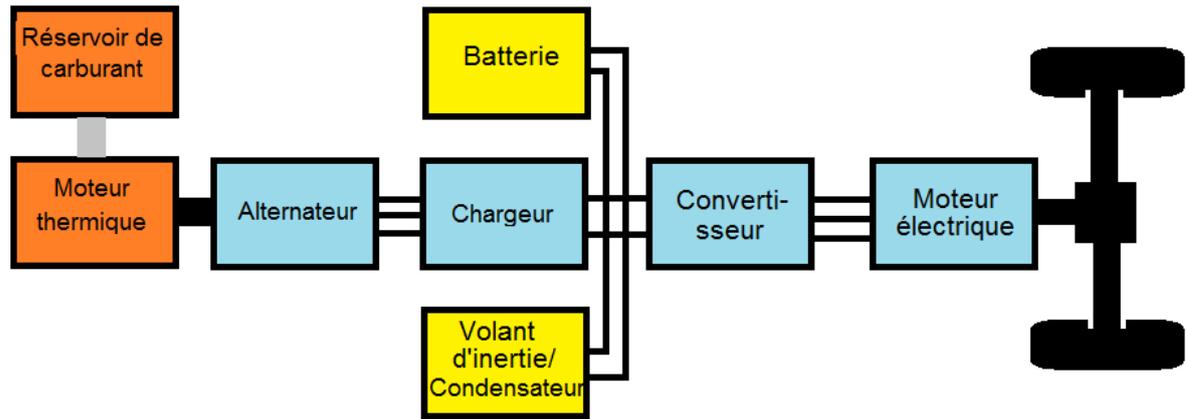


Figure 1.1: Architecture hybride série

**Avantages :**

- Contrôle optimal du moteur à combustion.
- Le moteur à combustion et le moteur de traction électrique peuvent être positionnés dans le véhicule qui permettent de nouvelles dispositions de véhicules.
- Le moteur à combustion n'a pas besoin d'être dimensionné pour la puissance maximale.

**Inconvénients :**

- Plusieurs étapes de conversions énergétiques, entraînent plus de pertes.
- Le système d'entraînement électrique doit être dimensionné pour une puissance maximale.

**1.2.3.2 Architecture hybride parallèle**

C'est le moteur thermique qui sert à déplacer le véhicule (transmission mécanique, embrayage, boîte de vitesse). On lui adjoint un moteur électrique qui utilise l'énergie des batteries électrochimiques rechargeables. Grâce à son couple élevé, disponible immédiatement, le moteur électrique aide le moteur thermique dans les phases où il est peu efficace (démarrages, reprises). Lors des phases de freinage ou de décélération, le moteur électrique se transforme en générateur, récupère une partie de l'énergie cinétique et recharge la batterie. L'architecture générale de la technologie hybride parallèle est schématisée par la figure (1.2) [Rou08, Ker09, Ber00, GBC10, SLB14].

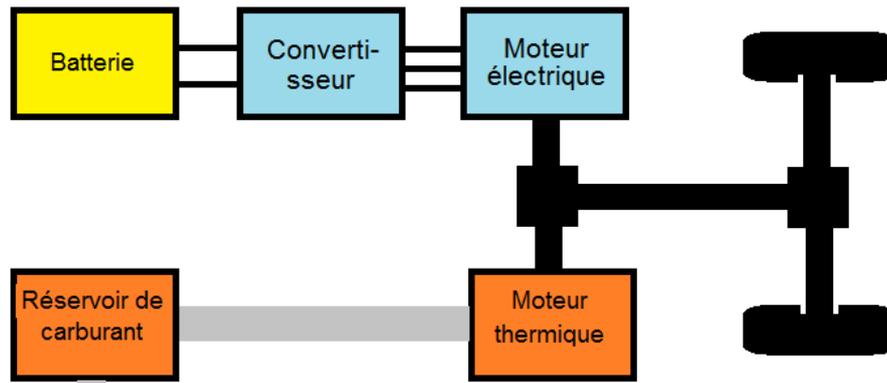


Figure 1.2: Architecture hybride parallèle

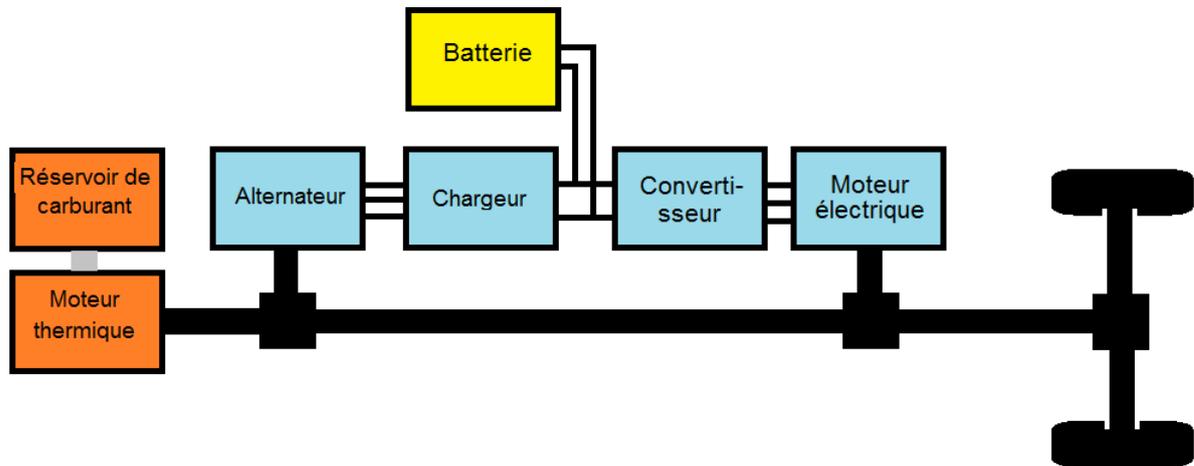


Figure 1.3: Architecture hybride mixte

### 1.2.3.3 Architecture hybride combinée

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle. Cette architecture intègre un moteur électrique, une génératrice et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté, fournies de l'autre, il est possible de contrôler en régime le moteur thermique et de partager son couple entre les demandes du véhicule et la recharge de la batterie. La figure (1.3) schématise le fonctionnement d'un hybride combiné [Rou08, GBC10].

### 1.2.4 Degrés d'hybridation des véhicules électriques hybrides

Les *VEHs* sont classés en trois architectures comme décrit précédemment mais, ils peuvent également être classifiés en fonction du degré d'hybridation [Mal14]. Il existe trois classes :

- Dans le **Micro hybrid** ou les véhicules ayant la fonctionnalité dite *stop/star*, le moteur est éteint pendant le freinage ou à l'arrêt pour éviter le fonctionnement au ralenti, et le démarreur est utilisé pour démarrer le moteur lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélération.
- **Mild hybrid** est essentiellement un véhicule conventionnel d'un démarreur surdimensionné, ce qui permet également au *MCI* d'être éteint lorsque le véhicule est en roue libre, freinage, ou arrêté et rapidement redémarrer lorsque le conducteur appuie sur la pédale d'accélération.
- **Full hybrid** est équipé d'une grande machine électrique et une grande batterie; l'usage du mode électrique, dit « Zéro Emission », est plus étendu que dans la version Mild hybrid. La machine électrique (en mode moteur) peut propulser seul le véhicule si nécessaire et régénérer l'énergie (en mode générateur) du freinage et la stocker dans la batterie.

## 1.3 Stratégies de la gestion de l'énergie

Avec l'apparition relativement récente des véhicules électriques hybrides; le problème de la gestion d'énergie devient très intéressant pour les chercheurs et les industriels pour optimiser la répartition de puissance entre les sources principales (*MCI* ou pile à combustible) et les éléments de stockage (batteries, supercondensateurs et volants d'inertie). Dans la littérature, il y a deux visions de classifier les stratégies de gestion d'énergie. La première, concerne une classification On/Off-line [Mal14, Sol12, Tri10] et une autre classification basée sur l'obtention des approches de gestion d'énergie à savoir les techniques à base d'optimisation et les techniques à base de règles [Sad13, Sal07].

### 1.3.1 Stratégies On/Off-line

La gestion de l'énergie peuvent être classées selon la première vision en deux catégories: des stratégies On-line qui nécessitent uniquement des informations en temps réel et des stratégies Off-line qui requièrent une connaissance a priori de la puissance demandée.

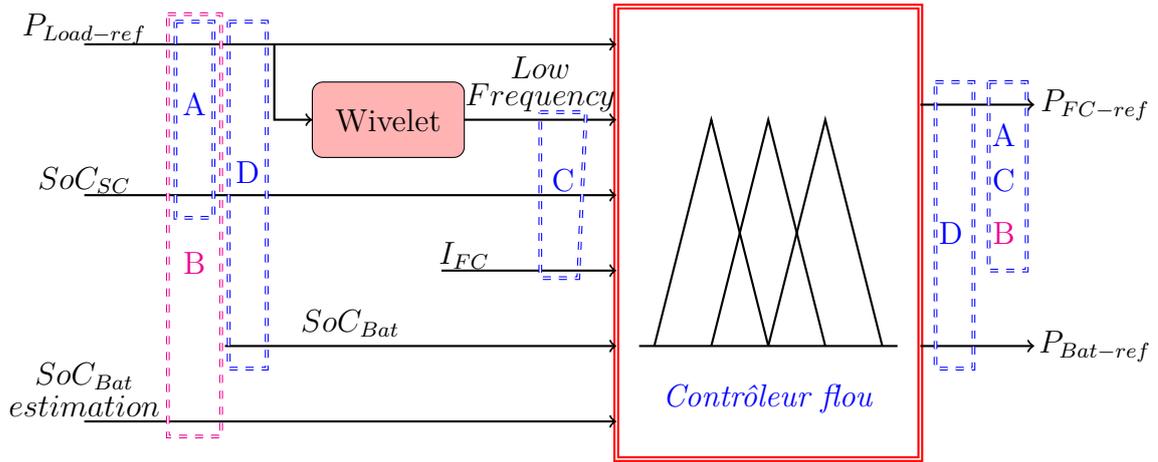


Figure 1.4: Gestion d'énergie des VEH par contrôleur flou

A [CHF10], B [LXH<sup>+</sup>09], C [EVUA09], D [GJL08]

### 1.3.1.1 Stratégies On-line

Le premier groupe de ces stratégies de gestion d'énergie est les stratégies On-line. Ces stratégies tiennent en considération les informations en temps-réel (vitesse ou accélération de véhicule, puissance, tension, courant ou l'état de charge des sources ou charges). Ces techniques, sont généralement basées sur des règles qui permettent l'optimisation On-line. Les conditions réelles de la conduite sont très aléatoire; en fonction du trafic, du type de route, du style de conduire ou de conditions météorologiques. Les techniques On-line, sans connaissance préalable de futures conditions de conduire, semblent être plus adéquate pour effectuer la gestion de l'énergie dans les véhicules routiers. L'inconvénient de ces techniques est qu'elles proposent des solutions qui ne sont pas nécessairement optimales [SMJHP12]. Parmi les techniques On-line, stratégies de gestion de l'énergie à base de la logique floue, régulation de la tension du bus continu ou régulation de l'état de charge.

- **Stratégies à base de la logique floue :**

Les contrôleurs flous sont largement utilisés à effectuer la gestion de l'énergie dans les véhicules électriques hybrides. Ces contrôleurs ne nécessitent pas des modèles mathématiques complexes comme l'exige le contrôle classique, sachant qu'il a été démontré que ce type de contrôleurs fonctionnent dans des applications réelles.

[SMJHP12] a conçu un contrôleur flou en utilisant des ensembles flous de type-2 pour la gestion de l'énergie dans un VEH équipé de trois sources d'énergie : batteries, supercondensateurs et un système de pile à combustible. Une validation

expérimentale du même travail est présentée dans [SMMH<sup>+</sup>13].

En règle générale, la sortie du contrôleur flou est une référence de puissance de la source de conversion de l'énergie (Pile à combustible). Cette sortie est calculée pour fournir la puissance nécessaire à propulser le véhicule, tout en préservant l'état de charge de la batterie et/ou du supercondensateur entre les limites prédéterminées. Dans les *VEH*, le calcul de la valeur de référence ne considère pas la valeur précédente de la puissance de sortie de la pile à combustible. Le principal inconvénient est que la valeur de référence peut varier beaucoup plus rapidement que la sortie réelle, ce qui peut provenir des problèmes de stabilité [Sol12].

[CHF<sup>+</sup>10] a présenté un contrôleur flou pour la gestion de l'énergie dans un *VEH* équipé d'une pile à combustible et supercondensateur où les entrées sont l'état de charge du *SC* et la puissance de la charge demandée. [LL09] et [LXH<sup>+</sup>09] ont présenté des travaux similaires pour un *VEH* équipé d'une pile à combustible et batterie, dont [LXH<sup>+</sup>09] a ajouté l'estimation de l'état de charge de la batterie comme une troisième entrée.

[EVUA09] et [EEG<sup>+</sup>09] ont proposé un contrôleur flou pour une source hybride à pile à combustible et supercondensateur. Dans cette stratégie, la puissance de référence de la charge est filtrée en utilisant la transformée en ondelettes et la puissance à basse fréquence est uniquement utilisée comme entrée du contrôleur flou. [DK14] à utilisé la même stratégie et le même contrôleur pour source hybride à batterie et supercondensateur. La figure (1.4) montre les contrôleurs flous qui ont une sortie de référence absolue.

- **Régulation de la tension du bus continu :**

Les stratégies de la gestion de l'énergie basées sur la régulation de la tension du bus continu se concentrent sur la gestion des pics transitoires de puissance pendant l'accélération et le freinage, en utilisant les sources de stockage de l'énergie (Supercondensateur, Volants d'inertie ou Batteries). Ces techniques exploitent la dynamique rapide du système de stockage pour renforcer la dynamique lente de la pile à combustible.

[TPM<sup>+</sup>10] et [PPMTD11] ont présenté une commande par platitude des transferts d'énergie dans une source hybride à pile à combustible et supercondensateur en fixant la valeur de la tension du bus continu à une valeur de référence dépendant de

l'état de charge du système. Pour la même structure, [ABH<sup>+</sup>10] et [ABH11] ont proposé une commande basée sur la passivité et une commande par mode glissant respectivement.

- **Régulation de l'état de charge :**

L'état de charge (*SoC*) est un indicateur de l'énergie stockée dans un système de stockage. Un *SoC* élevé indique la disponibilité de l'énergie mais une capacité faible pour la récupération et *SoC* faible indique une faible énergie mais une capacité élevée pour la récupération. Le *SoC* doit être maintenu dans une intervalle prédéterminée pour éviter le fonctionnement dans les points extrêmes de la charge.

### 1.3.1.2 Stratégies Off-line

Une des approches la plus répandue dans la commande optimale, est la programmation dynamique. Elle est basée essentiellement sur l'optimisation des solutions des problèmes non linéaires avec contraintes; en effet, elle permet de calculer en boucle fermée une lois de commande qui dépend directement de l'état précédent par l'association des équations de *Hamilton-Bellman-Jacobi* à la théorie des graphes. Un outil d'optimisation globale dédié à l'optimisation énergétique des véhicules hybride appelé « KOALA » basé sur ce principe [Ker09, SDRT<sup>+</sup>05]. Cette technique a été présentée afin de minimiser la consommation du carburant ou de l'hydrogène et l'émission dans les véhicules électriques hybrides ou à pile à combustible. Cette technique possède certains inconvénients de telle sorte qu'il est difficile à l'implémenter sachant qu'elle ne peut pas être adaptée aux modèles complexes [Sol12].

[FCK<sup>+</sup>14] a proposé deux méthodes pour une gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride à pile à combustible; la première est un algorithme de programmation linéaire appliqué Off-line et la deuxième, c'est une optimisation On-line par des contrôleurs PID. Le même auteur a amélioré la première méthode citée auparavant [FCP<sup>+</sup>15], par un algorithme de programmation dynamique amélioré par pondération appliqué Off-line.

Une autre méthode a été proposée par [YLZ<sup>+</sup>15], appelée gestion de l'énergie à base de SCM (Stiffness Coefficient Model) pour améliorer la consommation d'hydrogène d'un véhicule électrique hybride à pile à combustible; cette commande régule le *SoC* de la batterie par des coefficients de pondération simulés Off-line.

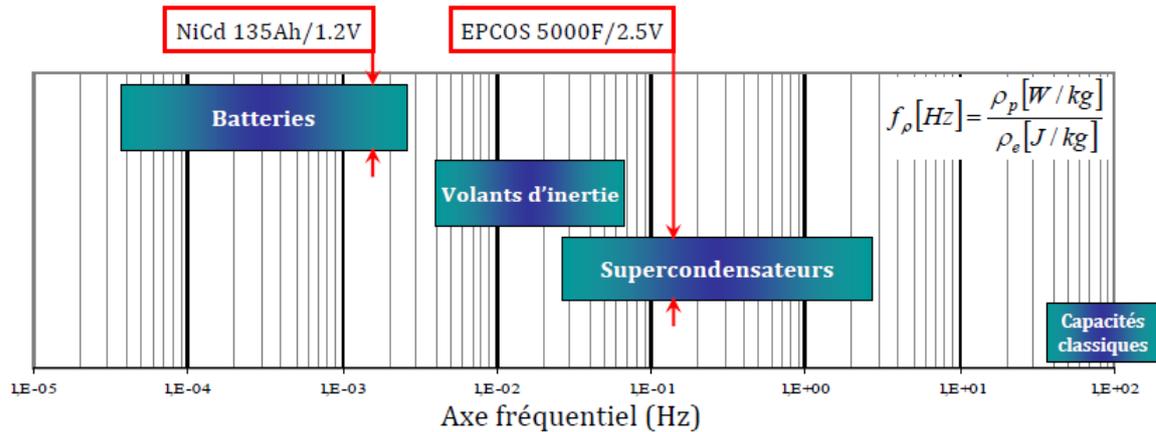


Figure 1.5: Projection du plan de Ragone sur un axe fréquentiel [Akl08].

Certains auteurs proposent une autre approche appelée *Stratégie de gestion énergétique fréquentielle* [Cha99, Akl08]; le premier propose une analyse fréquentielle de Fourier pour filtrer le profil de puissance, où la distribution de l'énergie est basée sur les caractéristiques des sources et le filtrage fréquentiel : les sources qui ont une énergie spécifique élevée fournissent les harmoniques à basse fréquence et les sources qui ont une puissance spécifique élevée fournissent les harmoniques à haute fréquence. Le deuxième auteur propose une stratégie fréquentielle pour la gestion d'énergie d'une locomotive contient un MCI, un système à volant d'inertie et des batteries. Le MCI fonctionne à un point constant, le volant d'inertie fournit la partie de puissance à haute fréquence et les batteries fournissent la partie de puissance à basse fréquence. La figure (1.5) résume l'appartenance fréquentielle de chaque source.

## 1.3.2 Stratégies à base Optimisation/Règles

### 1.3.2.1 Stratégies à base d'optimisation

Dans les stratégies de contrôle à base d'optimisation, en minimisant les fonctions de coût, la consommation de carburant et/ou les émissions du  $CO_2$ , la référence des couples optimales et rapports de vitesse optimales peuvent être trouvées. Les solutions optimales globales peuvent être obtenues en effectuant l'optimisation sur un cycle de conduite fixe. Cependant, avec ces techniques de contrôle, de gestion de l'énergie en temps réel n'est pas possible directement. En même temps, les résultats de ces stratégies peuvent être utilisées pour comparer les caractéristiques des autres stratégies de contrôle et également

en tant que base afin de définir des règles pour la mise en œuvre en ligne [DW09].

### 1.3.2.2 Stratégies à base de règles

L'aspect principal impliqué dans les approches de gestion de l'énergie à base de règles est leur efficacité en temps réel ainsi que le contrôle du flux de puissance dans l'entraînement hybride. Les règles sont conçues sur la base de l'heuristique, l'intuition, l'expertise humaine et les modèles mathématiques et même, en général, sans connaissance a priori d'un cycle de conduite prédéfini [Sal07]. Ces stratégies peuvent être classées en stratégies à base de règles déterministes et règles floues [OR12]. Les contrôleurs à base de règles déterministes fonctionnent sur un ensemble de règles qui ont été définies et mises en œuvre avant l'utilisation réelle et des machines d'état sont proposées comme une méthode réussie de leur mise en œuvre [WE11]. Les systèmes flous sont basés sur la connaissance des experts ou des systèmes à base de règles floues. La connaissance d'un expert peut être utilisée pour former une base de règles et en utilisant la prise de décision par la logique floue, un contrôle en temps réel peut également être réalisé [DW09].

## 1.4 Stabilités des systèmes non linéaires

### 1.4.1 Stabilité au sens de Lyapunov

Dans cette section, nous rappellerons quelques concepts sur la stabilité des systèmes dynamiques à temps continu. La notion de stabilité d'un système dynamique caractérise le comportement de ses trajectoires autour des points d'équilibre. L'analyse de la stabilité d'un système dynamique permet donc d'étudier l'évolution de sa trajectoire lorsque l'état initial est proche d'un point d'équilibre [Zer11].

L'outil fondamental de l'étude de la stabilité des systèmes est la théorie de Lyapunov. Cette théorie est basée sur l'idée que si une fonction ayant une forme énergétique soit dissipée dans le temps, alors elle tend vers un point d'équilibre. Dans ce contexte, l'utilisation de la fonction de Lyapunov est une mesure de distance entre les variables d'états et le point d'équilibre. On considère un système non linéaire décrit par son modèle d'état :

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t) \tag{1.1}$$

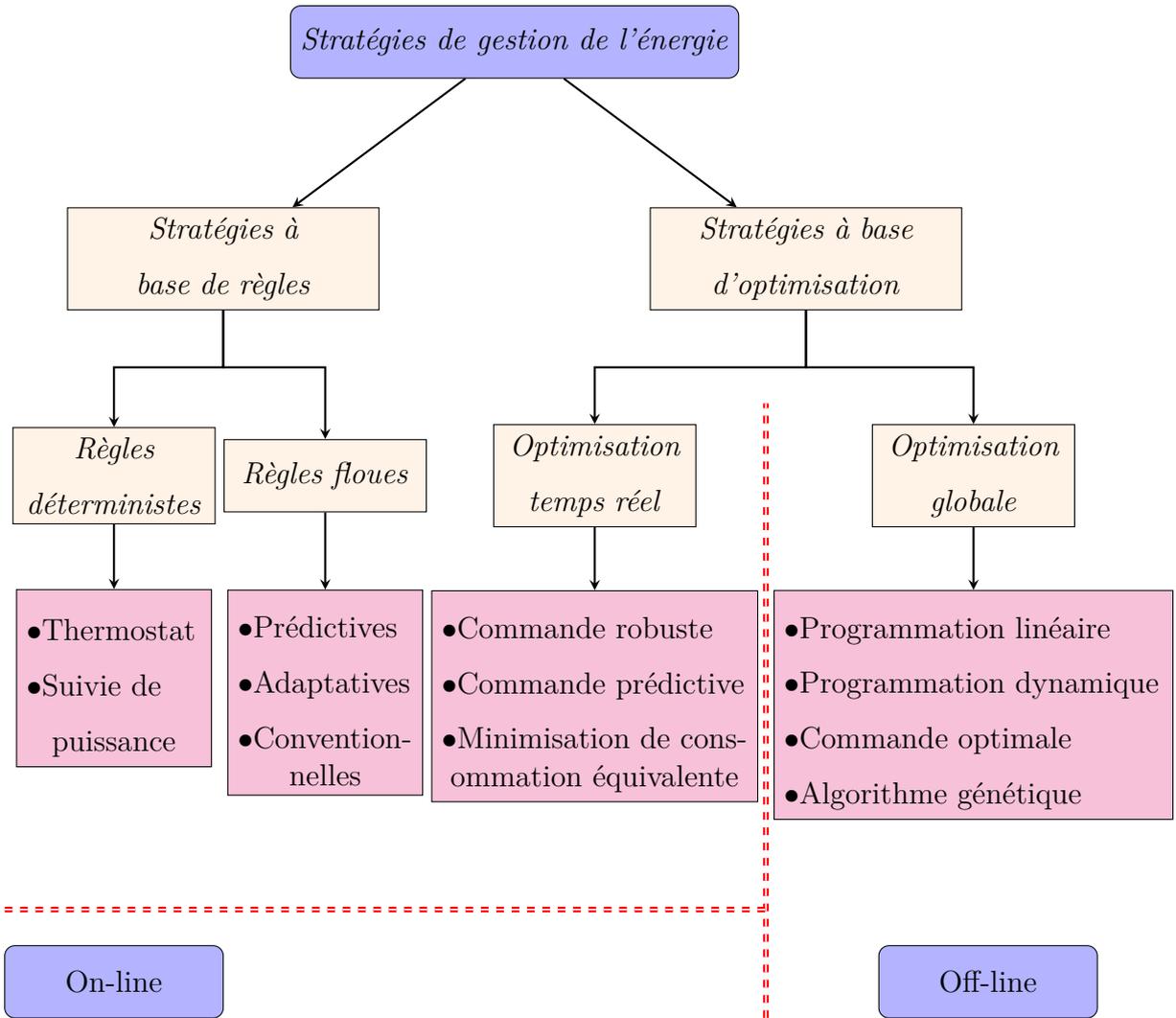


Figure 1.6: Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie

Avec  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^n$  et la condition initiale  $x(t_0) = x_0$ , on suppose que le système possède un point d'équilibre  $\bar{x}$ .

**Définition 1.1** (Équilibre stable [Zem07, Zer11]). Le point  $\bar{x}$  est un point d'équilibre stable du système (1.1) si :  $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0$  tel que ;  $\|x_0 - \bar{x}\| < \delta \Rightarrow \|x(t, x_0, u) - \bar{x}\| < \varepsilon, \forall t \geq t_0$  avec  $x(t, x_0, u)$  désigne la solution à l'instant  $t \geq t_0$  du système (1.1). Si cette condition n'est pas satisfaite, le point d'équilibre est instable.

**Définition 1.2** (Équilibre attracteur [Zem07, Zer11]). Le point  $\bar{x}$  est un point d'équilibre attracteur du système (1.1) si :  $\exists \delta > 0$ ; tel que  $\|x_0 - \bar{x}\| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t, x_0, u) - \bar{x}\| = 0, \forall t \geq t_0$

$\bar{x}$  est un équilibre attracteur veut dire que  $\bar{x}$  est un point vers lequel convergent les solutions

$x(t)$  si elles démarrent suffisamment près de  $\bar{x}$ . Lorsque  $\delta = +\infty$ , on dit que  $\bar{x}$  est globalement attractif.

**Définition 1.3** (Équilibre asymptotiquement stable [Zem07, Zer11]). Le point  $\bar{x}$  est un point d'équilibre asymptotiquement (globalement asymptotiquement) stable pour le système (1.1) s'il est stable et attractif (globalement attracteur).

Un ensemble d'états initiaux  $x_0$  à partir desquels les trajectoires convergent vers un équilibre asymptotiquement stable est appelé bassin d'attraction.

La stabilité asymptotique est la propriété qui est généralement recherchée en pratique. Cette définition ne nous dit rien sur la vitesse avec laquelle la trajectoire  $x(t)$  converge vers son équilibre. C'est pourquoi, on introduit la notion suivante de stabilité exponentielle.

**Définition 1.4** (Stabilité exponentielle [Zem07], [Zer11]). Le point  $\bar{x}$  est un point d'équilibre exponentiel stable si :  $\forall \varepsilon > 0, \exists \alpha > 0$  et  $\delta > 0$  tel que;

$$\|x_0 - \bar{x}\| < \delta \implies \|x(t, x_0, u) - \bar{x}\| \leq \alpha \|x_0 - \bar{x}\| \exp(-\beta t), \quad \forall t \leq t_0$$

Il est évident que la stabilité exponentielle implique la stabilité asymptotique mais l'inverse n'est pas nécessairement vrai.

Par la suite, nous nous intéresserons à la stabilité autour de l'origine c-à-d quand  $\bar{x} = 0$ . La difficulté de cette méthode repose sur la détermination de ces fonctions. Cependant, il existe deux grande familles des fonctions de Lyapunov.

## 1.4.2 Fonction de Lyapunov quadratique

Différents types de fonctions de Lyapunov sont souvent proposées pour résoudre le problème de stabilité au sens de Lyapunov. La plus simple correspond à la recherche d'une fonction de Lyapunov quadratique définie positive à dérivée négative [Mar09]. Le choix le plus utilisable est de la forme suivante :

$$V(x(t)) = x(t)^T P x(t), \quad P > 0 \tag{1.2}$$

où  $x(t)$  représente le vecteur d'état du système.

**Exemple illustratif :**

Soit le système non linéaire décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{x} - \varepsilon x^2 \dot{x} + x = 0$$

Si  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & \varepsilon x_1^2 \end{bmatrix}$ , alors, on peut écrire le système sous la forme  $\dot{x} = Ax$ .

Pour analyser la stabilité de ce système, on introduit une fonction quadratique de Lyapunov de la forme suivante :

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)$$

$$\dot{V}(x_1, x_2) = x_1\dot{x}_1 + x_2\dot{x}_2 = \varepsilon x_1^2 x_2^2$$

La seule condition pour que le système soit stable, est de  $\varepsilon \leq 0$ . On distingue ici deux cas :

- Si  $\varepsilon = 0$ , le système est globalement stable.
- Si  $\varepsilon < 0$ , le système est globalement asymptotiquement stable.

### 1.4.3 Fonction de Lyapunov non quadratique

L'utilisation de fonction de Lyapunov quadratique peut être très conservatrice. Pour restreindre le pessimisme de la méthode quadratique, il est possible d'utiliser des fonctions de Lyapunov non quadratiques. Souvent leurs expressions sont étroitement liées à la nature de non linéarité du système [Mar09]. L'exemple suivant utilise une fonction de Lyapunov non quadratique.

#### **Exemple illustratif :**

Soit le système linéaire suivant, décrit par :

$$\dot{x} = \begin{cases} (A + Bk_1^T)x & \text{si } k_1^T x < k_2^T x \\ (A + Bk_2^T)x & \text{si } k_2^T x \leq k_1^T x \end{cases}$$

Si

$$A = \begin{bmatrix} -5 & -4 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -3 \\ -21 \end{bmatrix}, \quad k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

alors l'analyse de la stabilité par la fonction de Lyapunov  $V(x) = x^T P x$ , ne permet pas de conclure sur la stabilité du système.

On considère alors la fonction de Lyapunov non quadratique :

$$V(x) = \begin{cases} x^T P x & \text{si } (k_1 - k_2)^T x < 0 \\ x^T P x + \eta((k_1 - k_2)^T x)^2 & \text{si } k^T x \geq 0 \end{cases}$$

avec  $P > 0$  et  $\eta \in \mathbb{R}^*$ , construite de telle sorte qu'elle soit continue et quadratique par

morceau. Afin d'obtenir une fonction de Lyapunov définie positive à dérivée négative, il suffit de poser :  $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$  et  $\eta = 9$

La stabilité globale asymptotique a donc pu être démontrée par l'utilisation d'une fonction de Lyapunov non quadratique.

**Remarques :**

- En général, il n'existe pas de méthode pour trouver une fonction de Lyapunov candidate pour un système non linéaire.
- La théorie de Lyapunov nous donne des domaines de stabilité qui sont très souvent non optimisés, loin du domaine de stabilité trouvé par l'expérimentation.
- Dans cette thèse, on s'intéresse uniquement par la stabilité de Lyapunov quadratique.

## 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes architectures des véhicules hybrides ont été présentées. Nous avons vu apparaître de nombreuses stratégies en vue d'optimiser au mieux la répartition de la puissance entre la source principale (le moteur thermique ou pile à combustible) et l'élément de stockage d'énergie. La bibliographie sur la commande et la gestion d'énergie des systèmes hybrides a fait apparaître une grande diversité d'approches difficiles à comparer. Cependant, la suite de notre étude sera consacrée à l'étude des différentes sources utilisées dans les systèmes hybrides et leurs hybridations.

# *Description, Modélisation et Hybridation des Sources : Pile à Combustible, Batterie et Supercondensateur*

---

2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Pile à combustible . . . . .	22
2.2.1	Principe de fonctionnement . . . . .	22
2.2.2	Types de piles à combustible . . . . .	24
2.2.3	Pile à combustible de type PEM . . . . .	25
2.3	Éléments de stockage de l'énergie électrique . . . . .	28
2.3.1	Batteries . . . . .	29
2.3.2	Supercondensateurs . . . . .	31
2.4	Structure d'un système électrique hybride . . . . .	35
2.5	Association batterie/supercondensateur . . . . .	36
2.5.1	Topologie en cascade avec un convertisseur DC/DC . . . . .	36
2.5.2	Topologie en cascade avec deux convertisseurs DC/DC . . . . .	37
2.5.3	Topologie parallèle avec deux convertisseurs DC/DC . . . . .	37
2.6	Hybridation de FC/SC . . . . .	38
2.6.1	Équations du système . . . . .	39
2.7	Hybridation de FC/Batterie . . . . .	44
2.8	Hybridation de Batterie/SC . . . . .	46
2.9	Hybridation de FC/Batterie/SC . . . . .	48
2.10	Conclusion . . . . .	51

---

## 2.1 Introduction

Un système électrique hybride comprend des sources d'énergie de natures différentes, renouvelables et/ou conventionnelles. On s'intéresse ici (vis-à-vis aux problèmes d'émission de  $CO_2$ ) aux sources propres utilisées dans les systèmes hybrides dédiés à la propulsion électrique (pile à combustible, supercondensateurs et batterie). Dans ce chapitre, nous allons voir; dans un premier temps, la description, les types et la modélisation des sources les plus utilisées dans les systèmes électriques hybrides à propulsion. Dans un deuxième temps, nous allons consacrer notre étude aux différentes hybridations des sources qui existent dans la littérature et nous favorisons quelques hybridations selon notre étude en déterminant leurs modèles globales par des modèles d'espace d'état pour les utiliser dans le dernier chapitre.

## 2.2 Pile à combustible

Les piles à combustibles sont des moyens de production de l'énergie électrique, considérées comme des sources d'énergie de par leur grande densité d'énergie. Le diagramme de *Ragone* présenté par la figure (2.1) permettant de comparer les performances énergétiques de différents dispositifs. Ce dernier montre que les piles à combustible présentent les densités d'énergie les plus élevées par rapport aux autres dispositifs.

### 2.2.1 Principe de fonctionnement

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit directement l'énergie chimique en énergie électrique, sans aucun processus thermique ou mécanique externe [THO<sup>+</sup>10]. Il existe divers types de pile à combustible, mais toutes ces piles gardent en commun les caractéristiques suivantes :

- Elles sont essentiellement constituées de deux plaques (plaques bipolaires) permettant notamment l'amenée des gaz, la collecte du courant et assurant la tenue mécanique, et de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un électrolyte.
- Sur l'anode, on déclenche une réaction d'oxydation électrochimique d'un composé hydrogéné (le combustible). Cette réaction produit des électrons et met en jeu un

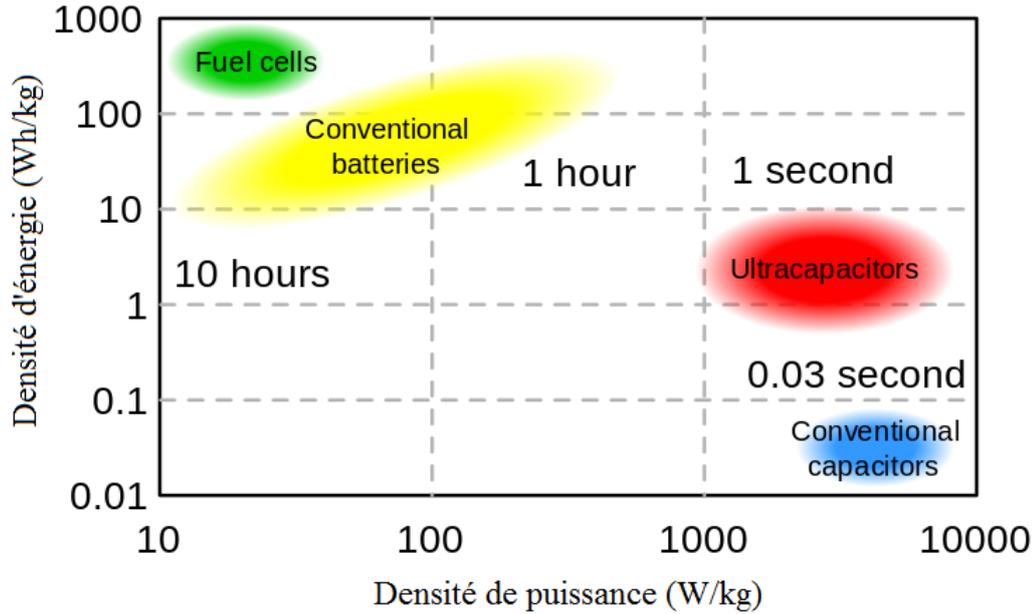


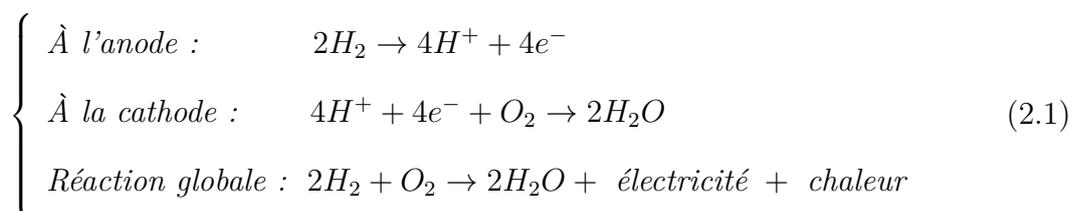
Figure 2.1: Diagramme de Ragone pour divers dispositifs d'énergie

ion.

- Sur la cathode, on déclenche une réaction de réduction électrochimique en présence d'oxygène (le comburant) et des électrons venus de l'anode via la charge extérieure, et qui met en jeu le même ion qu'à l'anode. Le comburant est généralement l'oxygène de l'air.
- Les réactions électrochimiques nécessitent un catalyseur sur chaque électrode; de plus elles produisent de la chaleur et de l'eau.
- Entre ces deux électrodes, un électrolyte permet le transfert de l'ion mis en jeu tout en étant un isolant électrique vis-à-vis des électrons générés à l'anode. Cet électrolyte peut être solide ou liquide [Zan10].

On rencontre deux équations de principe selon que l'électrolyte soit acide ou alcalin.

Pour un électrolyte acide, on a :



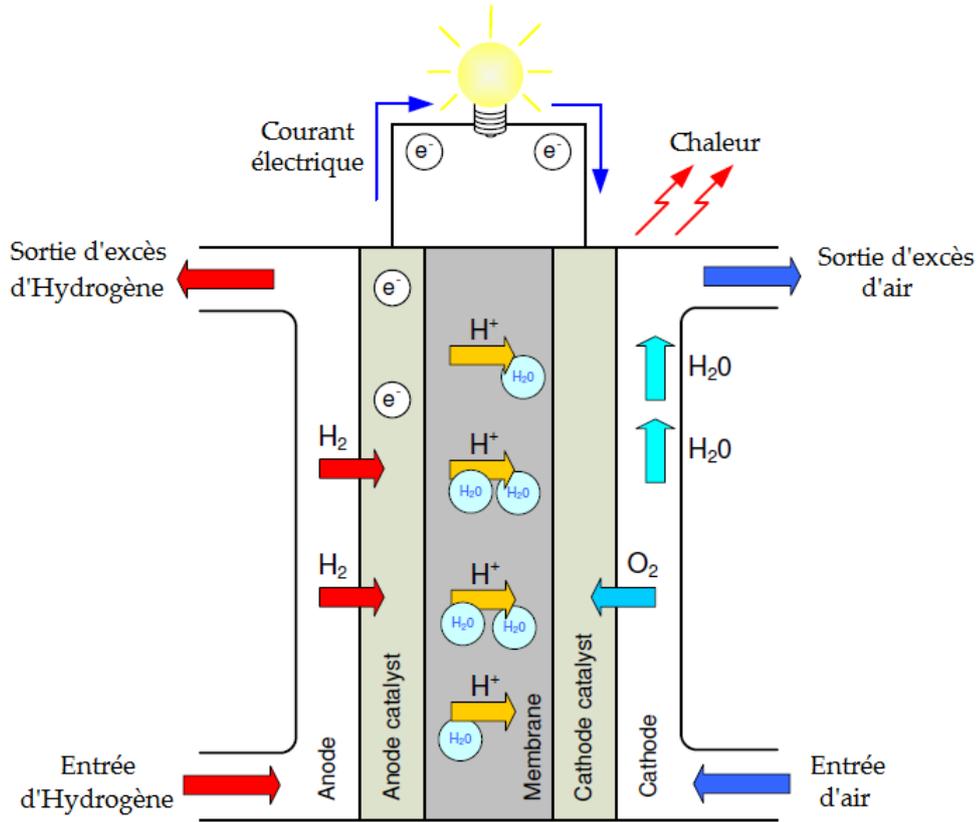
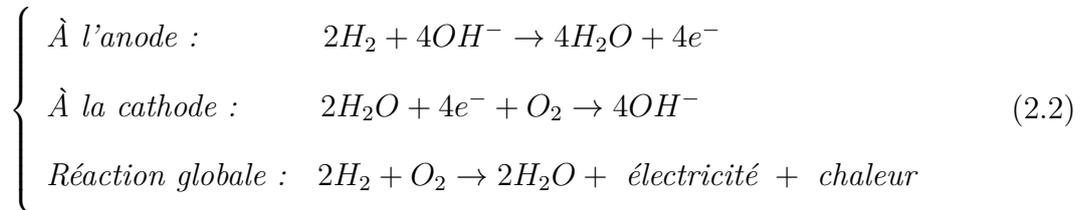


Figure 2.2: Schéma de principe d'une pile à combustible de type PEMFC [Fer09]

Pour un électrolyte alcalin, on a :



## 2.2.2 Types de piles à combustible

Depuis le début des programmes de recherche et développement sur les piles à combustible, plusieurs types de classifications ont été utilisées, basées sur des critères tels que le combustible, la température d'utilisation, la nature de l'électrolyte, la géométrie des systèmes, etc. A présent, la communauté scientifique a adopté une classification par type d'électrolyte. Le choix de l'électrolyte et du combustible utilisés détermine la nature des réactions aux électrodes, le type d'ions qui traversent l'électrolyte et conditionne de plus la température de fonctionnement de la pile [Azi10]. Nous pouvons distinguer six types de pile soit [Lac04] :

- Les piles à membranes polymère échangeuse de protons (PEMFC)
- Les piles au méthanol direct (DMFC)
- Les piles à acide phosphorique (PAFC)
- Les piles alcalines (AFC)
- Les piles à oxydes solides (SOFC)
- Les piles à carbonates fondus (MCFC)

Le tableau (2.1) récapitule les différents types de piles conventionnelles classées selon leur électrolyte tout en précisant leur température de fonctionnement et la nature de l'ion porteur de charge.

Type de FC	Type d'électrolyte	Ion mobile	Température de fonctionnement
PEMFC	Membrane en polymère solide	$H^+$	$70 - 100^\circ C$
DMFC	Membrane en polymère solide	$H^+$	$70 - 90^\circ C$
PAFC	Acide phosphorique liquide ( $H_3PO_4$ )	$H^+$	$150 - 220^\circ C$
AFC	Potasse liquide ( $KOH$ )	$OH^-$	$50 - 250^\circ C$
SOFC	Céramique solide ( $ZrO_2 - Y_2O_3$ )	$O^{-2}$	$700 - 1050^\circ C$
MCFC	Sel de carbonate fondu liquide ( $Li_2CO_3/K_2CO_3$ )	$CO_3^{-2}$	$600 - 800^\circ C$

Tableau 2.1: Différents types de piles à combustible [Han08, Lac04, SNCH<sup>+</sup>00]

### 2.2.3 Pile à combustible de type PEM

La structure fondamentale d'une pile à combustible de type *PEM* peut être décrite comme deux électrodes (anode et cathode) séparées par une membrane solide agissant comme un polymère électrolyte. Le carburant (l'hydrogène) circule à travers un réseau de canaux à l'anode, où il se dissocie en protons qui, à son tour, migre à travers la membrane vers la cathode [BH10]. Les électrons sont collectés en tant que courant électrique par

un circuit externe qui relie les deux électrodes. L'oxydant (Oxygène provenant de l'air) circule à travers un réseau similaire de canaux vers la cathode où l'oxygène se combine avec les électrons venant du circuit électrique externe et les protons traversant la membrane d'électrolyte, produisant ainsi de l'eau et de la chaleur [THO<sup>+</sup>10].

### 2.2.3.1 Modélisation de la pile à combustible de type PEM

Il existe plusieurs approches de modéliser une pile à combustible, telles que, les approches théoriques, l'approche semi-empirique et l'approche énergétique etc.... Le choix d'une approche ou autre est étroitement lié au niveau désiré de détails du modèle, c-à-d à sa complexité. Le niveau de complexité détermine d'une part, la zone modélisée du système pile à combustible (il peut s'agir d'une partie ou de la totalité d'une cellule, du stack, du stack et de ses systèmes auxiliaires...), et d'autre part, la finesse avec laquelle sont décrits les éléments modélisés [Fon05].

L'approche énergétique est originale aussi bien du point de vue de la communauté de l'Électrochimie que de celle du Génie Électrique. Il s'agit de modéliser tous les flux énergétiques (électriques, thermiques, fluidiques) au sein d'un composant électrochimique.

Les modèles développés sont implicitement dynamiques compliqués et gardent un lien fort avec les phénomènes physiques. La réduction des modèles reste une problématique à toute approche de modélisation.

A cause de la complexité des modèles dynamiques, nous favorisons et utiliserons, dans le reste de cette thèse, le modèle de Larminie-Diks [LDM03] en se basant sur la comparaison faite par A. Saadi [SBAA13] entre trois modèles statiques : modèle d'Amphlett [ABM<sup>+</sup>95], modèle de Chamberlin-Kim [KLSC95] et modèle de Larminie-Diks.

**a- Modèle statique de Larminie-Diks** Larminie et Dicks utilisent des équations empiriques pour décrire la caractéristique tension-courant de pile à combustible [LDM03]. Dans ce cas, les paramètres sont déterminés par identification des résultats expérimentaux. Cette caractéristique est décrite par la somme de quatre termes : la tension théorique à vide  $E_0$ , la surtension d'activation  $V_{act}$ , la surtension ohmique  $V_{ohm}$  et la surtension de concentration  $V_{conc}$ .

$$V_{FC} = E - V_{Act} - V_{Ohm} - V_{Conc} \quad (2.3)$$

Ces différentes surtensions peuvent s'exprimer en fonction du courant délivré par la pile selon les différentes relations suivantes.

- **Les pertes d'activation** : sont dues au démarrage des réactions chimiques à l'anode et à la cathode. Une partie de l'énergie disponible est utilisée pour briser et reformer les liaisons chimiques aux électrodes. Si ces pertes interviennent aux deux électrodes, la réaction d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide que la réduction de l'oxygène à la cathode. Il s'ensuit que les pertes d'activation sont essentiellement dues aux réactions cathodiques [Tho05]. La relation entre les pertes d'activation et la densité de courant est donnée par l'équation de Tafel :

$$V_{Act} = A.ln\left(\frac{I_{FC} + i_n}{i_0}\right) \quad (2.4)$$

où  $I_{FC}$  est le courant délivré par la pile à combustible,  $i_0$  le courant d'échange caractérisant à vide les échanges électrode-électrolyte,  $i_n$  le courant interne permettant de tenir compte d'une éventuelle traversée de gaz et/ou d'électrons à travers l'électrolyte et  $A$  la pente de la droite de Tafel.

- **Les pertes ohmiques** : sont dûes à la résistance qu'oppose les électrodes et les plaques bipolaires à la circulation des électrons et l'électrolyte au passage des protons. La chute de tension correspondante s'écrit :

$$V_{Ohm} = R_m.(I_{FC} + i_n) \quad (2.5)$$

où  $R_m$  est la résistance totale de la pile à combustible.

- **Les pertes de concentration** : La consommation des gaz appauvrit les mélanges gazeux et diminue la pression partielle des gaz. Cette réduction de pression dépend du courant délivré et des caractéristiques des circuits de gaz. Cette chute de tension s'exprime en fonction d'un courant limite  $i_L$ , pour lequel tout le combustible étant utilisé, sa pression tomberait à zéro, et d'une constante  $B$  appelée constante de transfert de masse :

$$V_{Conc} = -B.ln\left(1 - \frac{I_{FC} + i_n}{i_L}\right) \quad (2.6)$$

## b- Caractéristique statique tension-courant de la pile à combustible

Pour montrer la fiabilité du modèle statique de la pile choisi(de Larminie-Dicks), nous avons tracé la caractéristique tension-courant du modèle mathématique et celle des valeurs (tension, courant) expérimentales prises au sein du laboratoire FCLab (UTBM-France) d'une pile de type PEM NEXA Ballard 1.2 kW. La figure (2.3) montre la similarité et

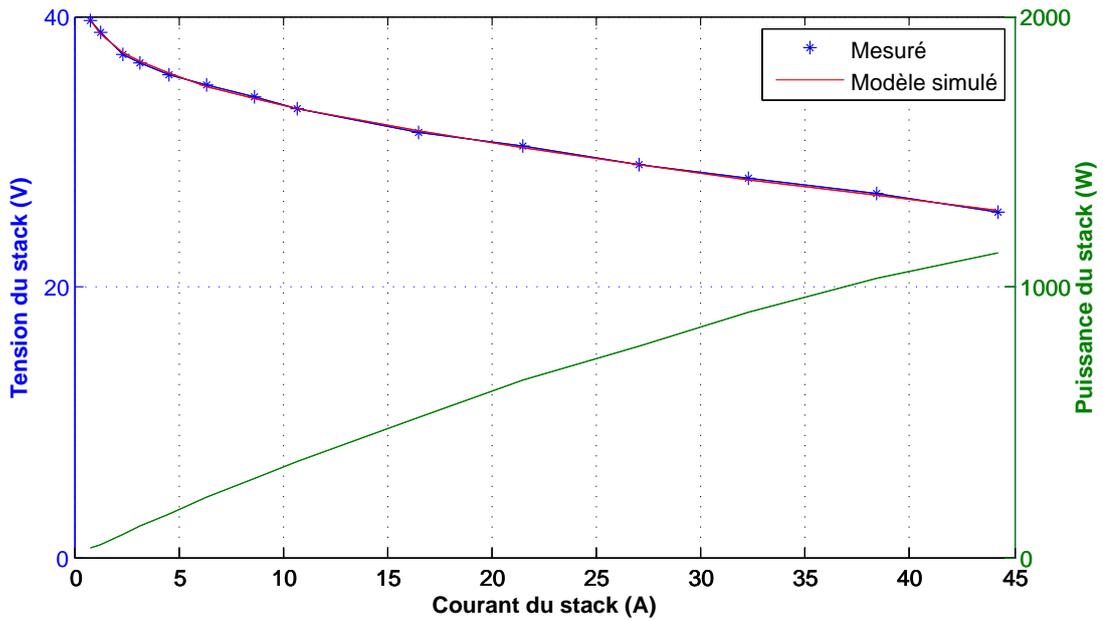


Figure 2.3: Caractéristique statique V-I simulée et mesurée d'une pile à combustible PEM NEXA 1.2 kW

la superposition des deux caractéristiques, ce qui prouve la validité de ce choix et son utilisation fréquente dans les modélisations des systèmes hybrides à pile à combustible.

## 2.3 Éléments de stockage de l'énergie électrique

Il existe plusieurs moyens de stocker de l'énergie électrique. Des moyens considérés comme des sources d'énergie sont des dispositifs capables de fournir une certaine puissance pendant un temps relativement long au vu de l'application, à savoir les accumulateurs électrochimiques (notamment les accumulateurs au plomb, au nickel et au lithium). Les moyens de stockage considérés comme des sources de puissance, relativement à l'échelle de temps de l'application, sont les condensateurs, les supercondensateurs, les bobines supraconductrices ou (*SMES*) et les volants d'inertie. [Dev12].

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux systèmes de stockage à base de batteries et supercondensateurs.

### 2.3.1 Batteries

Un accumulateur électrochimique ou batterie est un système qui permet de convertir de l'énergie électrique en énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge.

Une cellule d'une batterie est composée de deux électrodes (conducteurs électroniques) et d'un électrolyte (conducteur ionique). Les réactions chimiques sont spontanées dans la cellule et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents.

#### 2.3.1.1 Modélisation de la batterie

Les phénomènes électrochimiques complexes intervenant dans une batterie rendent leur modélisation délicate. Le schéma électrique équivalent retenu ici est présenté par la figure (2.4). Il est composé d'une force électromotrice  $E_B$ , c'est une caractéristique du couple électrochimique employé (selon le type de batterie), et  $R_B$  représente l'impédance interne de la cellule qui sont liées à l'état de charge et du vieillissement de la cellule. Le tableau (2.2) présente les différentes tensions de  $E_B$  en fonction des matériaux utilisés.

La tension aux bornes de la cellule d'une batterie s'exprime par [Ber07] :

$$V_B(\text{SoC}, I_B) = E_B(\text{SoC}) - R_B(\text{SoC}, \text{sign}(I_B))I_B \quad (2.7)$$

Avec

$$R_B(\text{SoC}, \text{sign}(I_B)) = \begin{cases} R_{B-\text{Charge}}(\text{SoC}) & \text{si } I_B \leq 0 \text{ (Résistance en charge )} \\ R_{B-\text{Décharge}}(\text{SoC}) & \text{si } I_B \geq 0 \text{ (Résistance en décharge )} \end{cases} \quad (2.8)$$

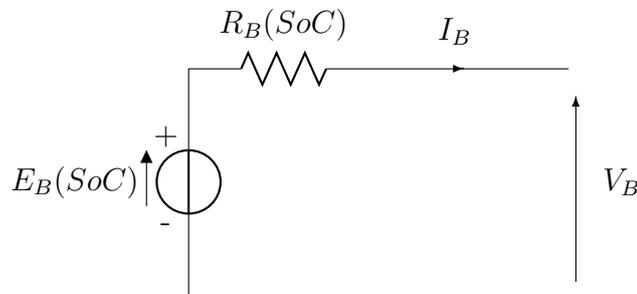


Figure 2.4: Schéma électrique équivalent d'un élément de batterie.

### 2.3.1.2 État de charge de la batterie (*SoC*)

L'état de charge d'une batterie est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité totale. L'état de charge est un paramètre très important pour gérer correctement la batterie [WLF13, TCS<sup>+</sup>09].

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{1}{C_N} \int_{t_1}^{t_2} I_B(t) dt \quad (2.9)$$

Où,  $SoC(t_0)$  est l'état de charge initial,  $I_B(t)$  représente le courant traversant la batterie et  $C_N$  la capacité nominale de la batterie exprimée en *Ah* ( $1 Ah = 3600 C$ ) [Mon09]. Tout comme la capacité, cet indicateur dépend des conditions de mesures, notamment, la température.

**Remarque :**

Il y a d'autres indicateurs qui caractérisent les batteries, la profondeur de décharge (*DoD*) qui est le rapport entre la capacité utile et la pleine capacité de la batterie et l'état de santé (*SoH*) qui prend en compte les pertes de capacité dues à la dégradation de la batterie. Le (*SoH*) est défini par le rapport entre la capacité totale actuelle et la capacité totale obtenue lorsque la batterie était neuve [Sad13].

$$DoD = 1 - SoC \quad (2.10)$$

$$SoH = \frac{C_{Actuelle}^{Tot}}{C_{Neuve}^{Tot}} \quad (2.11)$$

La connaissance de ces indicateurs permet d'identifier en temps réel le mode de fonctionnement de la batterie.

Type de batterie	$E_B(V)$	Anode	Cathode	Électrolyte
Acide-Plomb	2.1	$PbO_2$	$Pb$	$H_2SO_4$
Nickel-Cadmium	1.2	$Ni$	$Cd$	$KOH$
Nickel-Fer	1.2	$Ni$	$Fe$	$KOH$
Nickel-Zinc	1.7	$Ni$	$ZnO_2$	$KOH$
Nickel-Métal Hydrure	1.23	$Ni$	Métal Hydrure	$KOH$
Aluminium-Air	1.5	$Al$	$O_2$	$KOH$
Zinc-Air	1.65	$Zn$	$O_2$	$KOH$
Sodium-Soufre	2.1	$S$	$Na$	$\beta Al_2O_3$
Sodium-Nickel	2.1 – 2.2	$NiCl$	$Na$	$\beta Al_2O_3$
Lithium-Sulfate de Fer	1.75 – 2.1	$FeS_2$	$LiAl$ ou $LiSi$	$LiCl/KCl$
Lithium-Ion	3.6	Intercalation de carbone	$LiCoO_2$	Organique

Tableau 2.2: Matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques [Pai10]

### 2.3.2 Supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des moyens de stockage direct, électrostatique (et électrochimique), considérés comme des sources de puissance de par leur grande densité de puissance. On distingue trois grandes familles de supercondensateurs. C'est principalement la nature de leurs électrodes qui les différencie. Les performances des supercondensateurs sont récapitulées dans le tableau (2.3).

Électrode	Charbon actif		Oxydes métalliques	Polymère conducteur
Électrolyte	Acide sulfurique	Organique	Acide sulfurique	Organique
Énergie massique ( $Wh/kg$ )	0.2 – 1.1	2 – 4.2	2.7 – 5.5	11
Puissance massique ( $kW/kg$ )	1 – 10	0.1 – 2	10 – 100	100
Tension (V)	0.8 – 1.2	2 – 3	0.8 – 1.2	2.5
Durée de vie (Nbr de Cycles)	$> 10^5$	$> 10^5$	$> 10^5$	$10^4 – 10^5$

Tableau 2.3: Les différents types de supercondensateurs [Can02]

### 2.3.2.1 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des supercondensateurs est basé sur le principe de la double couche électrochimique, qui fut découvert par le physicien Helmholtz dans les années 1850. Il a remarqué que l'application d'une différence de potentiel sur des électrodes, mises en contact avec un électrolyte, provoque un regroupement des ions de cet électrolyte à la surface de cette interface [Lac04].

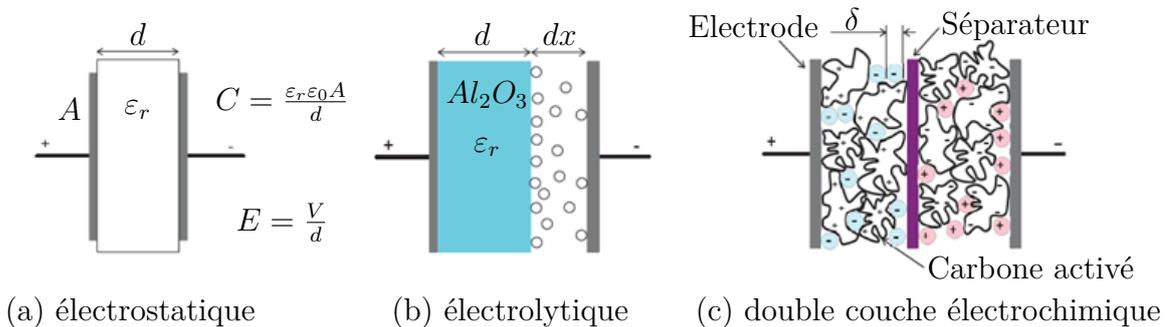


Figure 2.5: Différentes technologies de condensateurs

Pour maximiser la capacité d'un supercondensateur il faut maximiser les interfaces entre l'électrolyte et les électrodes, là où l'effet de double couche a lieu. Cette couche est de seulement quelques Angström ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) en épaisseur ce qui rend les capacités

très élevées car  $C = \frac{\varepsilon A}{4\pi\delta}$ .

Où  $\delta$  est l'épaisseur et  $A$  est la surface entre électrode-électrolyte [Tri10].

### 2.3.2.2 Modélisation des supercondensateurs

La modélisation la plus simple d'un supercondensateur est composée d'une capacité idéale en série avec une résistance (modèle RC simple), mais ce modèle ne permet pas de prendre en compte tous les phénomènes existants au sein d'un supercondensateur. Un autre modèle similaire au précédent qui modélise l'effet de l'auto-décharge en ajoutant une résistance en parallèle avec la capacité [Mor13].

Il existe un autre modèle non linéaire qui contient plusieurs branches RC en parallèle. La première branche de ce dernier possède une capacité variable en fonction de la tension, mais ce modèle est pris et simplifié à deux branches RC. La première branche dite principale décrit les phénomènes rapides (charge, décharge) et la deuxième dite lente pour décrire la redistribution interne de l'énergie après les dits phénomènes [Aya04].

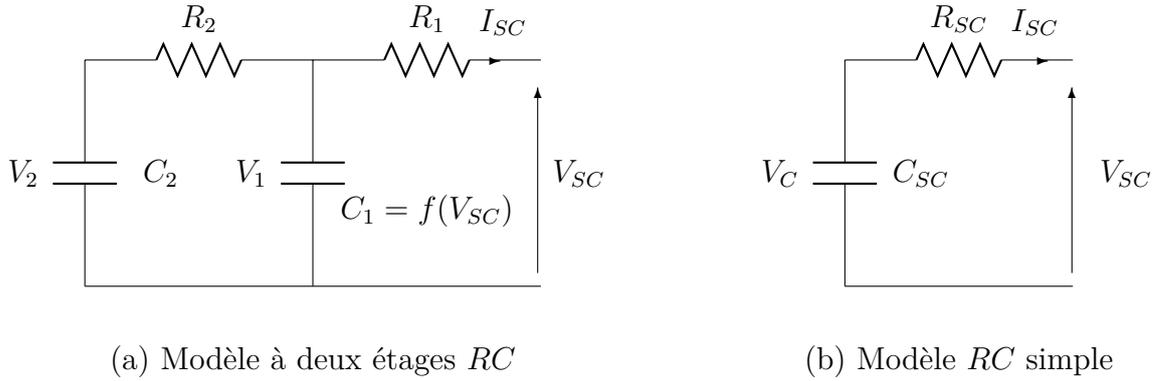


Figure 2.6: Schémas électriques équivalents d'un supercondensateur [Can02, Mak08]

A partir du modèle à deux étages *RC* de la figure (2.6.a), les équations suivantes peuvent être extraites :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_2 - V_1}{R_2} - I_{SC} \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2 - V_1}{R_2} \\ V_{SC} = V_1 - R_1 I_{SC} \end{cases} \quad (2.12)$$

Ce modèle peut aisément être modélisé grâce à une représentation sous forme d'équations

d'état.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (2.13)$$

où  $x = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$ ,  $u = I_{SC}$ ,  $y = V_{SC}$ ,  $A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_2 C_1} & \frac{1}{R_2 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$  et  $D = -R_1$ .

Dans les simulations du type contrôle-commande, un simple modèle  $RC$  de la figure (2.6.b) est très utile car il demande peu de temps de calcul pour simuler le comportement d'un supercondensateur, d'où :

$$V_{SC} = V_C - R_{SC} I_{SC} \quad (2.14)$$

L'énergie maximale  $W_{SCmax}$  contenue dans un supercondensateur est calculée pour la tension de service  $V_C$  par :

$$W_{SCmax} = \frac{1}{2} C_{SC} V_C^2 \quad (2.15)$$

On définit par le rapport entre la tension maximale  $V_{Cmax}$  et la tension minimale  $V_{Cmin}$  d'un élément qui représente la profondeur de décharge d'un élément de supercondensateur par :  $k = \frac{V_{Cmin}}{V_{Cmax}}$ .

L'énergie maximale utilisable  $W_{SCutile}$  est calculée entre la tension maximale et la tension minimale de service :

$$W_{SCutile} = \left[ \frac{1}{2} C_{SC} V_C^2 \right]_{V_{Cmin}}^{V_{Cmax}} = \left[ \frac{1}{2} C_{SC} V_C^2 \right]_{kV_{Cmax}}^{V_{Cmax}} = (1 - k^2) W_{SCmax} \quad (2.16)$$

En règle générale  $k = 0.5$ , alors :

$$W_{SCutile} = \frac{3}{4} W_{SCmax} \quad (2.17)$$

L'état de charge, appelé  $SoC$ , caractérise la quantité de l'énergie présentée dans le  $SC$ . Il vaut 1 lorsque le  $SC$  est complètement chargé et 0 lorsqu'il est chargé à sa valeur minimale :

$$SoC = \frac{1}{1 - k^2} \left( \frac{W_{SC}}{W_{SCmax}} - k^2 \right) = \frac{1}{1 - k^2} \left( \frac{V_C^2}{V_{Cmax}^2} - k^2 \right) \quad (2.18)$$

Pour  $k = 0.5$ , le  $SoC$  vaut alors :

$$SoC = \frac{4}{3} \left( \frac{W_{SC}}{W_{SCmax}} - \frac{1}{4} \right) = \frac{4}{3} \left( \frac{V_C^2}{V_{Cmax}^2} - \frac{1}{4} \right) \quad (2.19)$$

La tension maximale en charge d'un élément de supercondensateur est limitée pour des raisons technologiques à une tension de  $2.5V$ , de ce fait l'utilisation des supercondensateurs dans des applications de forte puissance ne peut se faire qu'en associant plusieurs éléments en série ( $N_S$ ) pour pouvoir atteindre des tensions importantes et en parallèle ( $N_P$ ) pour avoir de fortes intensités, donc on aura un pack de supercondensateurs.

Nous pouvons calculer la capacité et la résistance globale du pack de supercondensateurs par :  $C_{SCglobale} = \frac{N_P}{N_S} C_{SC}$  et  $R_{SCglobale} = \frac{N_S}{N_P} R_{SC}$ .

## 2.4 Structure d'un système électrique hybride

L'hybridation des sources consiste à combiner deux ou plusieurs sources pour exploiter leurs différentes caractéristiques (Autonomie, Réversibilité, Dynamique) [Sad13, Cam07]. C'est le cas des véhicules hybrides qui associent deux ou plusieurs sources d'énergie de nature différente pour la propulsion du véhicule. Les systèmes électriques hybrides peuvent être représentés par la figure (2.7). C'est une structure plus générale, sur laquelle on peut ajouter ou enlever les sources et les charges suivant la topologie du système [Pai10].

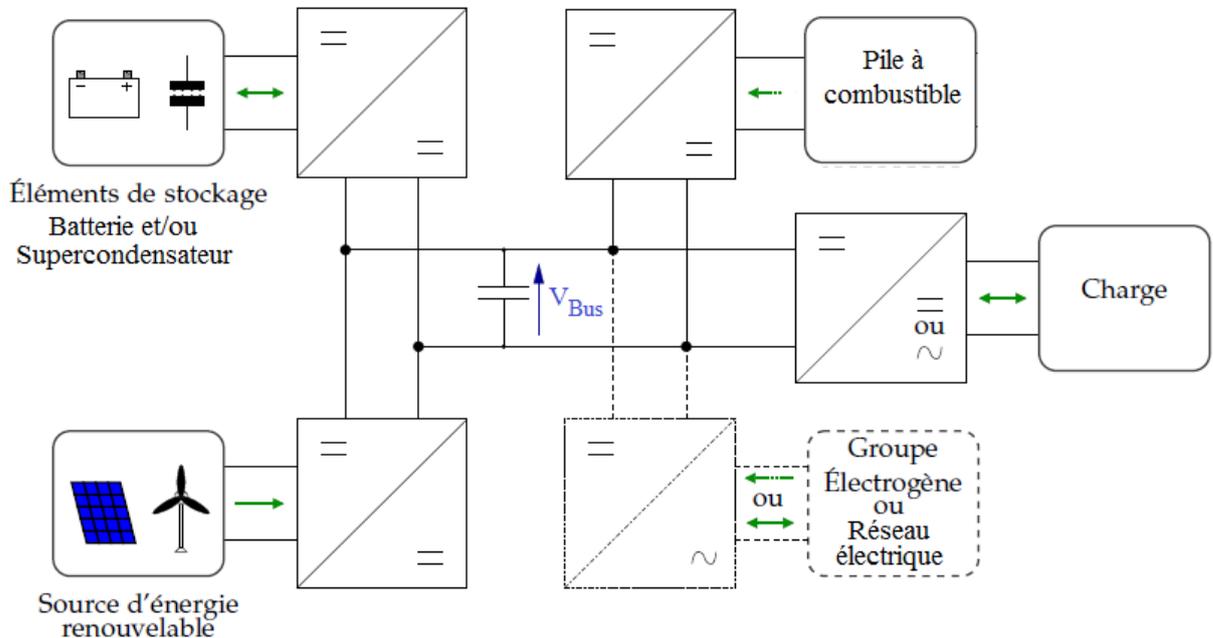


Figure 2.7: Structure générale d'un système électrique hybride [Pai10]

Pour le niveau de la tension du bus continu, il est en fonction de ses applications :

- 42V une nouvelle tension standard pour les systèmes automobiles [Tho05, TDRS09].
- 270V ou 350V pour la norme sur l'avion tout électrique [DBC06].
- 48V [AKHB04], 120V [WDLL05] pour les systèmes autonomes.
- 400 – 480V [LJCH06, CHE06] pour les systèmes raccordés aux réseaux électriques.
- 270 – 540V pour les véhicules électriques hybrides à pile à combustible [LCB+08]
- 350V (systèmes de bus de transport en commun) à 750V (les systèmes de tramway et de locomotive) [Ak108, KSLK08].

## 2.5 Association batterie/supercondensateur

Il existe plusieurs configurations pour connecter les sources de stockage de l'énergie à l'utilisateur : série, parallèle et avec un ou deux convertisseurs. Le ou les convertisseurs peuvent être des onduleurs qui sont généralement utilisés dans des applications de fortes tensions du bus continu. Pour l'hybridation d'une source (batterie/supercondensateur) dans le cas d'un véhicule hybride, une architecture à double étage d'onduleur a été étudié par [Cam07]. Cependant, les architectures, que nous détaillerons ci-dessous sont composées par des hacheurs et sont les plus fréquentes dans le domaine de l'automobile.

### 2.5.1 Topologie en cascade avec un convertisseur DC/DC

La figure (2.8) montre une topologie d'un système hybride installé dans un véhicule électrique étudié par [DO02]. Ce système comprend trois composantes principales : le convertisseur *DC/DC* bidirectionnel à base de transistors (IGBT), inductance de lissage, et de supercondensateurs; elles sont connectées en parallèle avec une batterie principale. Le branchement de la batterie du côté bus continu maintient la tension de ce dernier stable mais l'absence d'une isolation entre l'onduleur et la batterie peut endommager cette dernière lors des pics de puissances. Cette même topologie est adoptée par [DLR06], [Des08] pour alimenter un moteur CC d'un scooter. Contrairement, l'insertion du supercondensateur directement au bus continu comme le montre la figure (2.9) perturbe la tension de ce dernier car la tension du supercondensateur varie considérablement avec son état de charge.

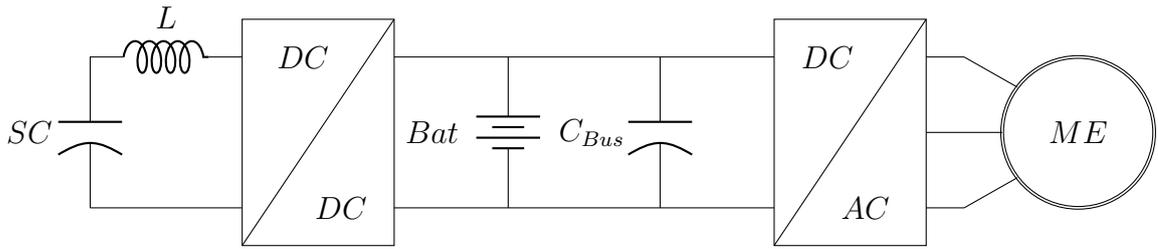


Figure 2.8: Convertisseurs DC/DC en cascade, batterie du coté bus continu

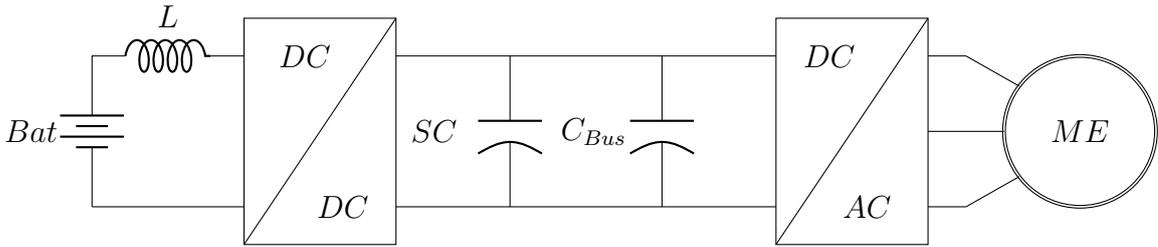


Figure 2.9: Convertisseurs DC/DC en cascade, supercondensateur du coté bus continu

### 2.5.2 Topologie en cascade avec deux convertisseurs DC/DC

Le système de stockage hybride (batterie et supercondensateurs) de la figure (2.8) alimente une machine par l'intermédiaire d'un onduleur, cette topologie est adoptée par [MRBLM14], [RFBS11]. Cette configuration en cascade, permet à la tension de la batterie d'être différente à celle des supercondensateurs à cause du convertisseur buck-boost supplémentaire entre eux. Les supercondensateurs sont chargés par la batterie et/ou la machine électrique et sont déchargés lors de la demande de puissance élevée (lors de démarrage). Le rendement de cette solution est faible, car l'énergie doit traverser les deux convertisseurs avant d'arriver au moteur.

Le principal inconvénient des topologies séries est leur fiabilité face à une défaillance de l'un des systèmes de stockage, de plus la distribution de puissance entre les deux sources ne peut pas se faire d'une manière indépendante [Sad13].

### 2.5.3 Topologie parallèle avec deux convertisseurs DC/DC

L'association active parallèle de deux convertisseurs DC/DC de la figure (2.11) proposée par [ATB10] présente un premier hacheur inséré entre la batterie et le bus continu et le second entre les supercondensateurs et le bus continu. Cette topologie présente

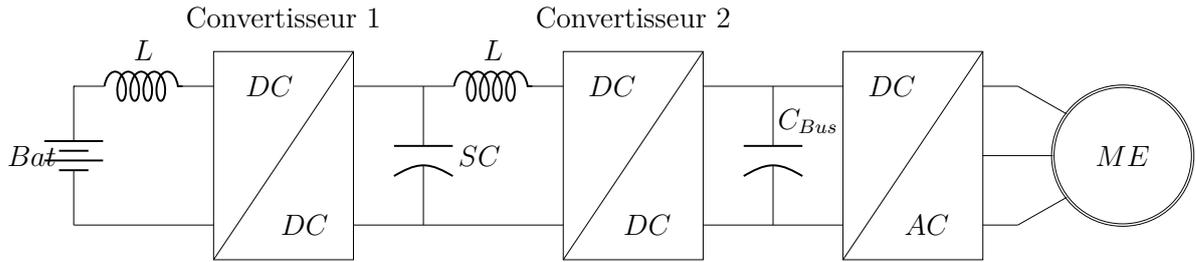


Figure 2.10: Architecture série avec deux convertisseurs DC/DC

l'avantage de dissocier la batterie et les supercondensateurs. Les deux degrés de liberté introduite par les deux hacheurs permettent de contrôler le flux de puissance entre les deux sources électriques et de contrôler la tension du bus continu.

L'association active parallèle offre la possibilité de fonctionner avec une seule source en cas de défaillance de l'autre, ce qui augmente la fiabilité du système global.

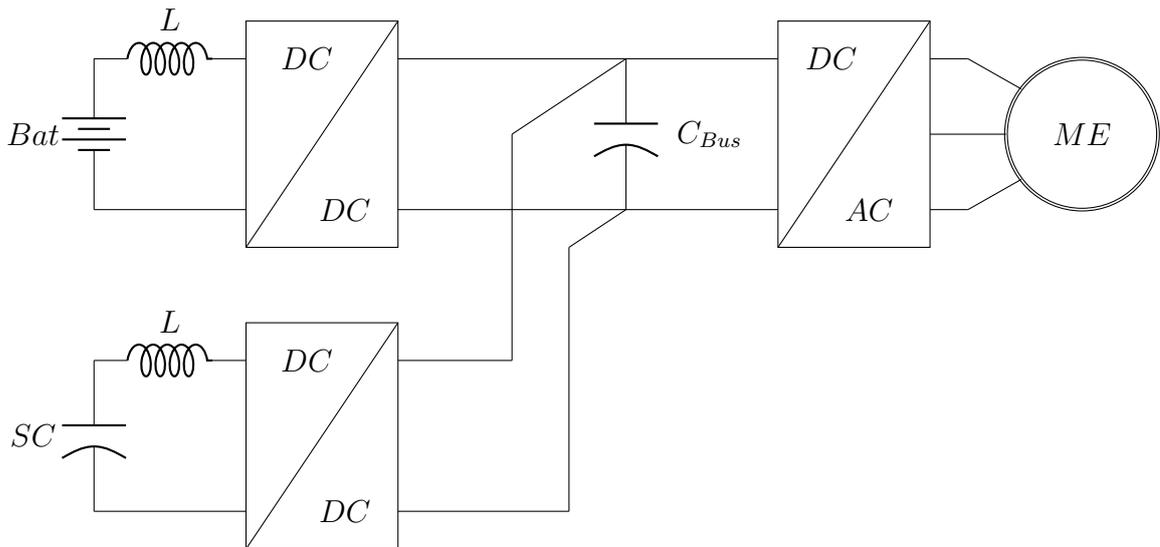


Figure 2.11: Architecture parallèle avec deux convertisseurs DC/DC

## 2.6 Hybridation de FC/SC

Cette hybridation consiste à diviser en deux la puissance à fournir à la charge, une partie dédiée à la pile à combustible et l'autre aux supercondensateurs [TCS<sup>+</sup>09, HVL<sup>+</sup>10, THNCB10]. Cette répartition de puissance dépend de la stratégie de commande.

La structure de cette source hybride contient un bus continu (DC Link) alimenté par une pile à combustible à travers un hacheur élévateur qui maintient la tension du bus

continu  $V_{DL}$  à sa référence  $V_d$ , et un moyen de stockage basé sur des supercondensateurs qui est connecté au bus continu à travers d'un hacheur abaisseur-élevateur bidirectionnel en courant; comme le montre la figure (2.12) [MBA+13].

La pile à combustible est la source principale, son rôle est de fournir la majorité de l'énergie à la charge alors que le moyen de stockage (supercondensateur) est une source auxiliaire qui alimente la charge pendant les régimes transitoire et permanent et récupère de l'énergie selon le mode de fonctionnement et son état de charge  $SoC_{SC}$ .

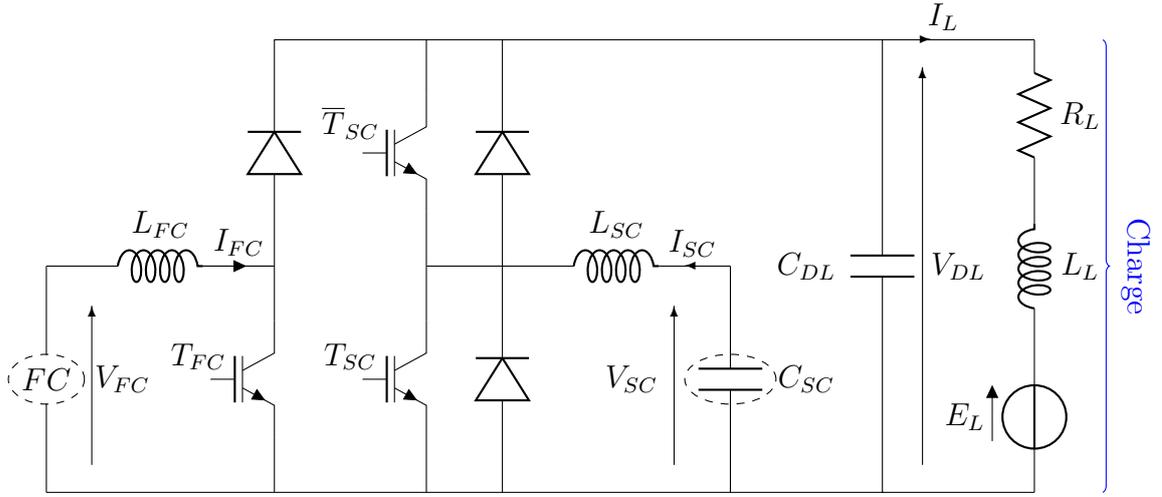


Figure 2.12: Structure de la source hybride FC/SC sans filtre

## 2.6.1 Équations du système

Le modèle global de ce système hybride est écrit dans un modèle d'espace d'état en choisissant le vecteur de l'espace d'état suivant :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = [I_{FC}, V_{DL}, V_{SC}, I_{SC}, I_L]^T \quad (2.20)$$

### 2.6.1.1 Modélisation du convertisseur boost du FC

Pendant ce mode de fonctionnement, si l'interrupteur statique (IGBT)  $T_{FC}$  est passant, une énergie est emmagasinée dans l'inductance  $L_{FC}$ . Le modèle du convertisseur boost

de la figure (2.13) est donné par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} = V_{FC} \\ C_{DL} \frac{dV_{DL}}{dt} = -I_L \end{cases} \quad (2.21)$$

Si l'interrupteur  $T_{FC}$  est ouvert, l'énergie stockée sera transférée au bus continu. Le modèle du convertisseur devient :

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} = -V_{DL} + V_{FC} \\ C_{DL} \frac{dV_{DL}}{dt} = I_{FC} - I_L \end{cases} \quad (2.22)$$

En posant  $U_{FC} = 1$  lorsque l'interrupteur  $T_{FC}$  est fermé et  $U_{FC} = 0$ , pour  $T_{FC}$  ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique. Les équations d'état du système s'écrivent en valeur moyenne et nous considérons ici que les interrupteurs sont parfaits [MSTV01, Lac04].

$$\begin{cases} L_{FC} \frac{dI_{FC}}{dt} = -(1 - U_{FC})V_{DL} + V_{FC} \\ C_{DL} \frac{dV_{DL}}{dt} = (1 - U_{FC})I_{FC} - I_L \end{cases} \quad (2.23)$$

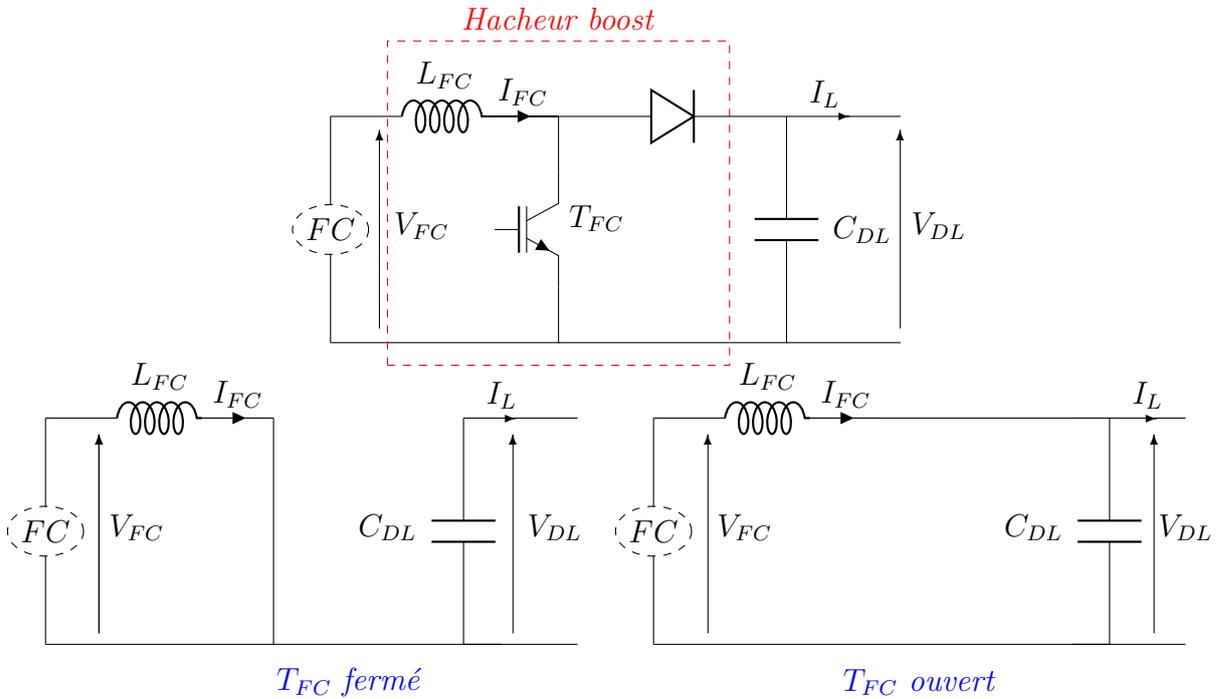


Figure 2.13: Schémas équivalents du convertisseur boost du FC

L'inductance de lissage minimale  $L_{FC}$  pour l'hacheur boost est calculée en fonction de l'ondulation maximale du courant souhaitée par la relation suivante :

$$L_{FC} = \frac{V_{DL}}{4f_d \Delta I_{FCmax}} \quad (2.24)$$

Le condensateur de filtrage minimale  $C_{DL}$  pour cet hacheur est calculé en fonction de l'ondulation maximale de la tension du bus continu  $\Delta V_{DLmax}$  souhaitée par la relation suivante :

$$C_{DL} = \frac{I_{FC}}{4f_d \Delta V_{DLmax}} \quad (2.25)$$

### 2.6.1.2 Modélisation du convertisseur buck-boost

Le calcul de l'inductance de lissage  $L_{SC}$  est réalisé comme précédemment, à la seule différence que ce convertisseur possède deux modes de fonctionnement distincts, soit en mode buck (abaisseur) soit en mode boost (élevateur).

Nous aboutissons ainsi à la même expression de l'ondulation maximale pour un rapport cyclique de 0.5, pour les deux modes de fonctionnement abaisseur ou élevéateur. Alors, l'inductance  $L_{SC}$  minimale est donnée par :

$$L_{SC} = \frac{V_{DL}}{4f_d \Delta I_{SCmax}} \quad (2.26)$$

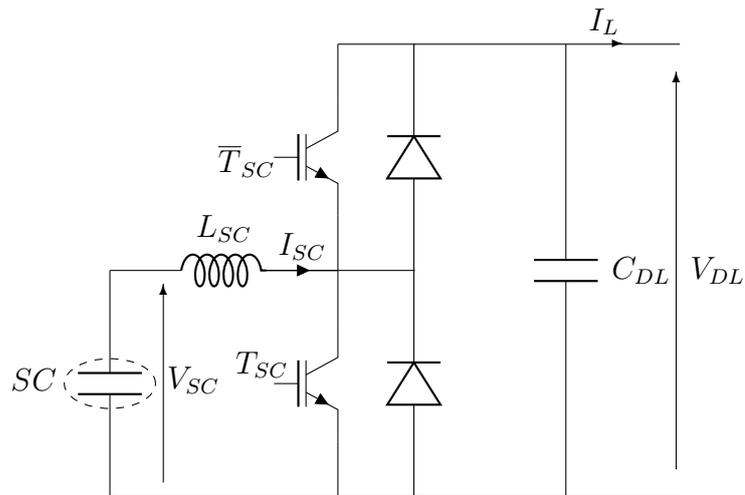


Figure 2.14: Schémas équivalents du convertisseur buck-boost du SC

Nous pouvons extraire la modèle d'équations globale suivant de la figure (2.12).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}}[-(1 - U_{FC})V_{DL} + V_{FC}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}}[(1 - U_{FC})I_{FC} + (1 - U_{SC})I_{SC} - I_L] \\ \frac{dV_{SC}}{dt} = \frac{1}{C_{SC}}[-I_{SC}] \\ \frac{dI_{SC}}{dt} = \frac{1}{L_{SC}}[-(1 - U_{SC})V_{DL} + V_{SC}] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L}[V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{array} \right. \quad (2.27)$$

Avec  $V_{FC} = f(I_{FC})$ , est le modèle statique de la pile à combustible de type (PEMFC) donné comme suit [LDM03] :

$$V_{FC} = E_0 - A \cdot \log\left(\frac{I_{FC} - i_n}{i_0}\right) - \left\{ R_m(I_{FC} - i_n) + B \cdot \log\left(1 - \frac{I_{FC} - i_n}{i_{Lim}}\right) \right\} \quad (2.28)$$

tel que  $U_{FC}$  et  $U_{SC}$  sont les signaux de commande du convertisseur boost de la pile à combustible et du convertisseur buck-boost des supercondensateurs successivement. Ensuite, le vecteur de commande est :

$$\mu = [\mu_1, \mu_2]^T = [(1 - U_{FC}), (1 - U_{SC})]^T \quad (2.29)$$

En utilisant les équations (2.20), (2.28) et (2.29) le système d'équation (2.27) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{L_{FC}}[-\mu_1 x_2 + V_{FC}] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C_{DL}}[\mu_1 x_1 + \mu_2 x_4 - x_5] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{SC}}[-x_4] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{SC}}[-\mu_2 x_2 + x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L_L}[x_2 - R_L x_5 - E_L] \end{array} \right. \quad (2.30)$$

En ajoutant un filtre  $LC$  à la sortie de l'ensemble pile à combustible/convertisseur [MKB+14], le système d'équation (2.27) devient à sept variables d'état, son expression est représentée par l'équation (2.31).

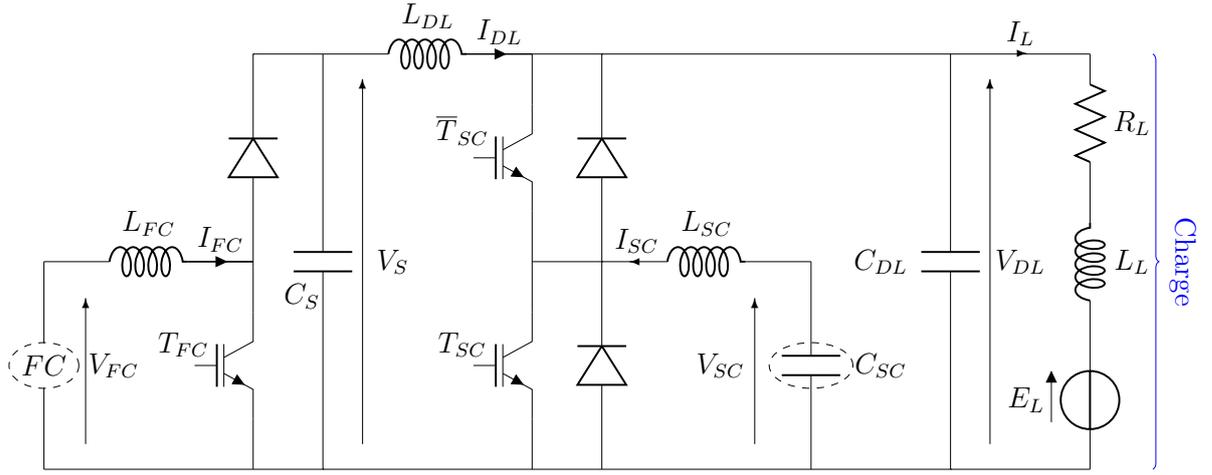


Figure 2.15: Structure de la source hybride FC/SC avec filtre

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S} [(1 - U_{FC})I_{FC} - I_{DL}] \\ \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [-(1 - U_{FC})V_S + V_{FC}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [I_{DL} + (1 - U_{SC})I_{SC} - I_L] \\ \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}} [V_S - V_{DL}] \\ \frac{dV_{SC}}{dt} = \frac{1}{C_{SC}} [-I_{SC}] \\ \frac{dI_{SC}}{dt} = \frac{1}{L_{SC}} [-(1 - U_{SC})V_{DL} + V_{SC}] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Le modèle global du système hybride de la figure (2.15) est écrit dans un modèle d'espace d'état en choisissant le vecteur de l'espace d'état suivant :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T = [V_S, I_{FC}, V_{DL}, I_{DL}, V_{SC}, I_{SC}, I_L]^T \quad (2.32)$$

et en utilisant le même vecteur de commande précédent de l'équation (2.29), on obtient

le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S}[\mu_1 x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}}[-\mu_1 x_1 + V_{FC}] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DL}}[x_4 + \mu_2 x_6 - x_7] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DL}}[x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{C_{SC}}[-x_6] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_{SC}}[-\mu_2 x_3 + x_5] \\ \dot{x}_7 = \frac{1}{L_L}[x_3 - R_L x_7 - E_L] \end{array} \right. \quad (2.33)$$

## 2.7 Hybridation de FC/Batterie

Ce Système hybride à pile à combustible/batterie, combine les avantages des deux sources d'énergie. La pile à combustible est considérée comme source principale qui fournit la majorité de la demande de la charge, alors que la batterie sert à compenser la puissance intermittente ou transitoire de la charge [MBA<sup>+</sup>15, XWW14]. De cette façon, ce système d'alimentation peut être intéressant pour certaines applications de secours [VAGB10] ou de propulsion des véhicules électriques et les petits avions [GJD<sup>+</sup>05] selon le type de la pile à combustible. Les sources de cette structure sont connectées à un bus continu (DC Link) à travers deux convertisseurs DC/DC; comme le montre la figure (2.16).

Le modèle global de ce système hybride est écrit dans un modèle d'espace d'état en choisissant le vecteur de l'espace d'état suivant :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [V_S, I_{FC}, V_{DL}, I_{DL}, I_B, I_L]^T \quad (2.34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S}[(1 - U_{FC})I_{FC} - I_{DL}] \\ \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}}[-(1 - U_{FC})V_S + V_{FC}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}}[I_{DL} + (1 - U_B)I_B - I_L] \\ \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}}[V_S - V_{DL}] \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B}[-(1 - U_B)V_{DL} - r_B I_B + e_B] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L}[V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{array} \right. \quad (2.35)$$

tel que  $U_{FC}$  et  $U_B$  sont les signaux de commande du convertisseur boost de la pile à combustible et du convertisseur buck-boost de la batterie successivement. Ensuite, le vecteur de commande est :

$$\mu = [\mu_1, \mu_2]^T = [(1 - U_{FC}), (1 - U_B)]^T \quad (2.36)$$

En utilisant les équations (2.34) et (2.36) le système d'équation (2.35) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S}[\mu_1 x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}}[-\mu_1 x_1 + V_{FC}] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DL}}[x_4 + \mu_2 x_5 - x_6] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DL}}[x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L_B}[-\mu_2 x_3 - r_B x_5 + e_B] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_L}[x_3 - R_L x_6 - E_L] \end{array} \right. \quad (2.37)$$

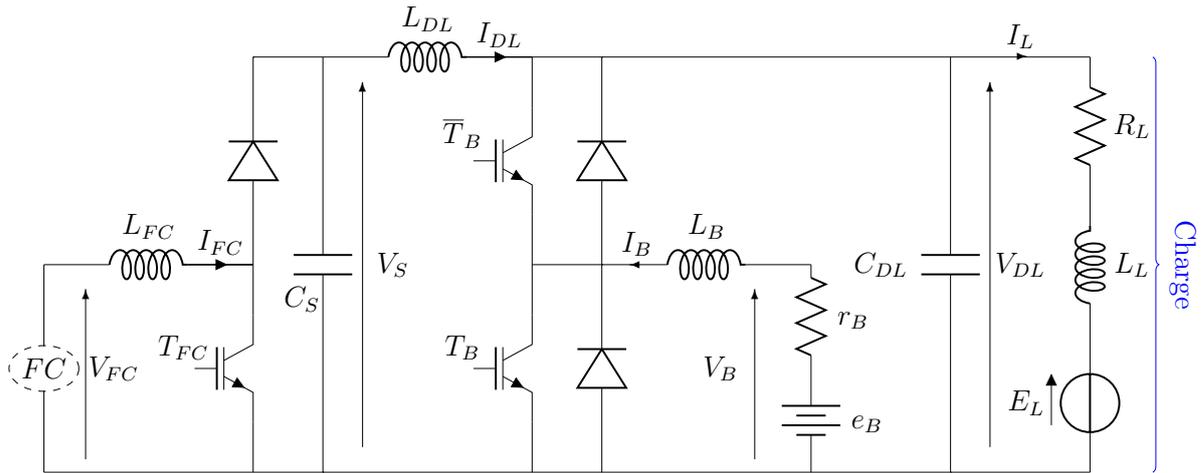


Figure 2.16: Structure de la source hybride FC/Batterie

## 2.8 Hybridation de Batterie/SC

Actuellement, la source principale d'énergie embarquée dans les véhicules électriques est composée de batteries, généralement de type Li-ion. En effet, la durée de vie fournie par les fabricants est estimée sur la base de tests de charge/décharge à courant constant, tandis que le vieillissement est un critère qui dépend fortement des conditions réelles d'utilisation (température, le profil de la charge, profondeur de décharge, ...). Afin de réduire les contraintes appliquées à la batterie, un pack de supercondensateurs peut être utilisé pour assurer les hautes puissances. Le rapport Batterie/Supercondensateurs dans les sources hybrides dépend de l'autonomie souhaitée et la stratégie de gestion d'énergie [SRBLM13].

La structure de cette source hybride contient une batterie comme source principale et un pack de supercondensateurs comme source auxiliaire qui sont connectés à un bus continu à travers deux hacheurs buck-boost (abaisseur-élevateur) bidirectionnels en courant pour maintenir la tension de ce dernier  $V_{DL}$  à sa référence  $V_d$ ; comme le montre la figure (2.17).

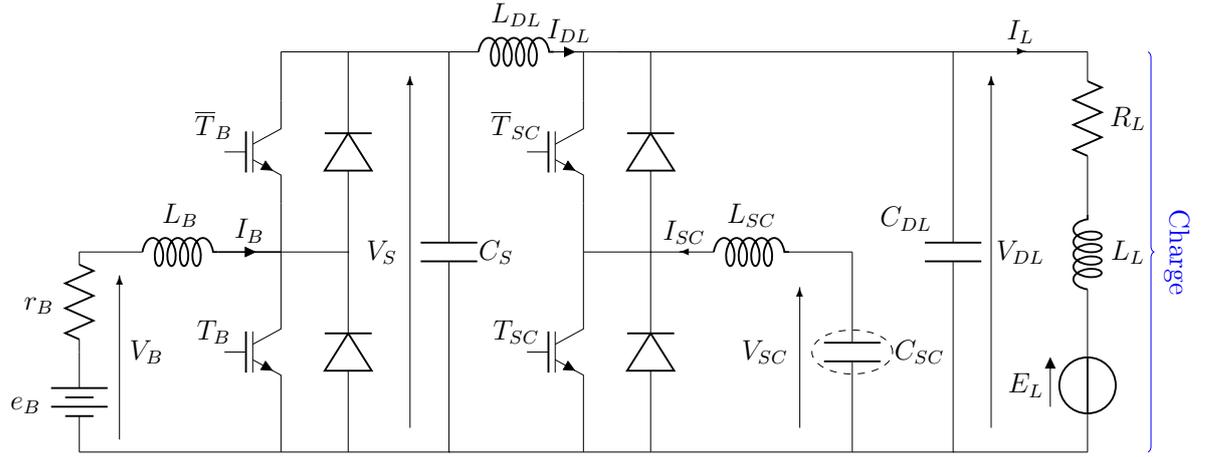


Figure 2.17: Structure de la source hybride Batterie/SC

Le modèle global de ce système hybride est écrit dans un modèle d'espace d'état en choisissant le vecteur de l'espace d'état suivant :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T = [V_S, I_B, V_{DL}, I_{DL}, V_{SC}, I_{SC}, I_L]^T \quad (2.38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S} [(1 - U_B)I_B - I_{DL}] \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B} [-(1 - U_B)V_S + e_B - r_B I_B] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}} [I_{DL} + (1 - U_{SC})I_{SC} - I_L] \\ \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}} [V_S - V_{DL}] \\ \frac{dV_{SC}}{dt} = \frac{1}{C_{SC}} [-I_{SC}] \\ \frac{dI_{SC}}{dt} = \frac{1}{L_{SC}} [-(1 - U_{SC})V_{DL} + V_{SC}] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{array} \right. \quad (2.39)$$

tel que  $U_B$  et  $U_{SC}$  sont les signaux de commande des deux convertisseurs buck-boost de la batterie et du supercondensateur successivement. Ensuite, le vecteur de commande est :

$$\mu = [\mu_1, \mu_2]^T = [(1 - U_B), (1 - U_{SC})]^T \quad (2.40)$$

En utilisant les équations (2.38) et (2.40) le système d'équation (2.39) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S}[\mu_1 x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_B}[-\mu_1 x_1 + e_B - r_B x_2] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DL}}[x_4 + \mu_2 x_6 - x_7] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DL}}[x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{C_{SC}}[-x_6] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_{SC}}[-\mu_2 x_3 + x_5] \\ \dot{x}_7 = \frac{1}{L_L}[x_3 - R_L x_7 - E_L] \end{array} \right. \quad (2.41)$$

## 2.9 Hybridation de FC/Batterie/SC

En général, la structure FC/SC a de meilleures performances parce que les supercondensateurs peuvent aider d'une manière plus efficace le FC pour satisfaire la demande transitoire de puissance de la charge (les supercondensateurs peuvent être chargés ou déchargés à un courant élevé, dans lequel la batterie ne peut pas fonctionner), et la charge et la décharge de la batterie par un courant très élevé permettra de réduire ainsi sa durée de vie [TCS+09].

Néanmoins, un véhicule hybride à pile à combustible avec supercondensateurs comme le seul moyen de stockage sera insuffisant ou aura même un dysfonctionnement lors du démarrage du véhicule en raison du temps de démarrage du FC (environ de 5 – 10 min), dans lequel la batterie grâce à son énergie spécifique plus élevée que le supercondensateur, peut alimenter les auxiliaires de la pile et du véhicule. Par conséquent, une solution plus pratique est d'associer les trois sources dans une seule source hybride (FC/Batterie/SC) pour augmenter la durée de vie de la batterie en raison de la réduction des charges et de décharges à haute intensité [TRD09].

La structure de cette source hybride contient un bus continu (DC Link) alimenté par une pile à combustible à travers un hacheur élévateur qui maintient la tension du bus continu  $V_{DL}$  à sa référence  $V_d$ , une batterie et un pack de superconsateurs comme moyens de stockage connectés au bus continu à travers deux hacheurs (abaisseur-élévateur) bidirectionnels en courant; comme le montre la figure (2.18).

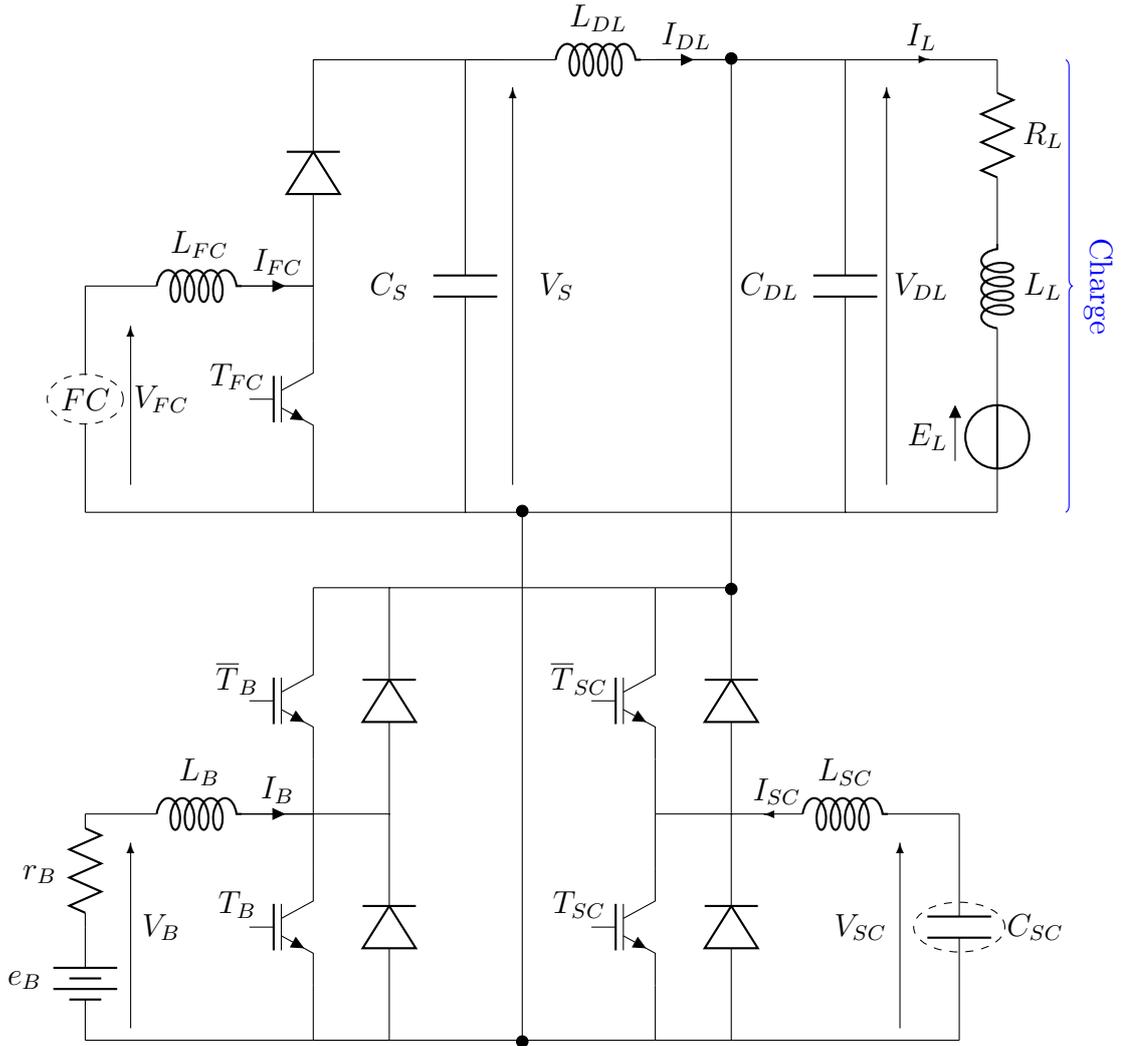


Figure 2.18: Structure de la source hybride FC/Batterie/SC

Le modèle global de ce système hybride est écrit dans un modèle d'espace d'état en choisissant le vecteur de l'espace d'état suivant :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T = [V_S, I_{FC}, V_{DL}, I_{DL}, V_{SC}, I_{SC}, I_B, I_L]^T \quad (2.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C_S}[(1 - U_{FC})I_{FC} - I_{DL}] \\ \frac{dI_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}}[-(1 - U_{FC})V_S + V_{FC}] \\ \frac{dV_{DL}}{dt} = \frac{1}{C_{DL}}[I_{DL} + (1 - U_{SC})I_{SC} + (1 - U_B)I_B - I_L] \\ \frac{dI_{DL}}{dt} = \frac{1}{L_{DL}}[V_S - V_{DL}] \\ \frac{dV_{SC}}{dt} = \frac{1}{C_{SC}}[-I_{SC}] \\ \frac{dI_{SC}}{dt} = \frac{1}{L_{SC}}[-(1 - U_{SC})V_{DL} + V_{SC}] \\ \frac{dI_B}{dt} = \frac{1}{L_B}[-(1 - U_B)V_{DL} + e_B - r_B I_B] \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L_L}[V_{DL} - R_L I_L - E_L] \end{array} \right. \quad (2.43)$$

tel que  $U_{FC}$ ,  $U_{SC}$  et  $U_B$  sont les signaux de commande du convertisseur boost de la pile à combustible et des deux convertisseurs buck-boost de la batterie et du supercondensateur successivement. Ensuite, le vecteur de commande est :

$$\mu = [\mu_1, \mu_2, \mu_3]^T = [(1 - U_{FC}), (1 - U_{SC}), (1 - U_B)]^T \quad (2.44)$$

En utilisant les équations (2.42) et (2.44) le système d'équation (2.43) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S}[\mu_1 x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}}[-\mu_1 x_1 + V_{FC}] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DL}}[x_4 + \mu_2 x_6 + \mu_3 x_7 - x_8] \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DL}}[x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{C_{SC}}[-x_6] \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_{SC}}[-\mu_2 x_3 + x_5] \\ \dot{x}_7 = \frac{1}{L_B}[-\mu_3 x_3 + e_B - r_B x_7] \\ \dot{x}_8 = \frac{1}{L_L}[x_3 - R_L x_8 - E_L] \end{array} \right. \quad (2.45)$$

## **2.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, la description et le principe de fonctionnement des différentes sources de stockage de l'énergie électrique, les plus utilisées dans la réalisation de sources électriques hybrides, a été introduit afin de permettre la simplification de la modélisation et l'évaluation du comportement d'un système électrique hybride.

La pile à combustible (FC) peut être utilisée comme une source principale. Elle peut fournir une énergie propre, mais son coût est très élevé par rapport aux sources d'énergie conventionnelles (batterie). Les supercondensateurs peuvent être utilisés comme sources auxiliaires dédiés au stockage de l'énergie, afin d'améliorer le comportement des systèmes électriques hybrides en régime transitoire.

Les systèmes électriques hybrides qu'on va les étudier dans ce qui suit sont des architectures des systèmes hybrides composés de Batterie/SC, FC/SC, FC/Batterie et FC/-Batterie/SC.

Les modèles analytiques des convertisseurs ont été développés. Ces modèles permettent d'établir les lois de commande par la commande basée sur la passivité.

# *Représentation Hamiltonienne par Ports et Commande par Passivité*

---

3.1	Introduction . . . . .	53
3.2	Équations d'Euler-Lagrange . . . . .	53
3.3	Vers la représentation par ports des systèmes hamiltoniens . . . . .	54
3.3.1	Exemple démonstratif : système masse-ressort . . . . .	54
3.3.2	Structure de Dirac . . . . .	57
3.4	Systèmes dissipatifs et passifs . . . . .	62
3.5	Commande basée sur la passivité des systèmes hamiltoniens représentés par ports . . . . .	63
3.5.1	Passivité standard et balance d'énergie . . . . .	65
3.5.2	Commande par injection d'amortissements . . . . .	66
3.5.3	Commande par interconnexion . . . . .	67
3.5.4	Assignment d'interconnexion et d'amortissement IDA-PBC . . . . .	68
3.6	Conclusion . . . . .	70

---

### 3.1 Introduction

La théorie de représentation hamiltonienne par ports (Port-hamiltonian  $PH$ ) est un cadre de modélisation bien développé pour représenter la dynamique des systèmes physiques complexes. Comme la théorie  $PH$  est dérivée de la modélisation de réseau à base de systèmes physiques, elle peut être utilisée pour modéliser des systèmes multi-domaines. Des exemples notables comprennent système mécanique, électrique, électromécanique, thermique et leurs combinaisons. Un avantage majeur de la représentation  $PH$  est qu'elle met en évidence la relation entre les diverses caractéristiques du système, telles que le stockage de l'énergie, la dissipation et l'interconnexion.

### 3.2 Équations d'Euler-Lagrange

Le système dynamique qui a  $n$  degrés de liberté avec des coordonnées généralisées  $q \in \mathbb{R}^n$  et des forces externes  $Q \in \mathbb{R}^n$  est décrit par les équations d'Euler-Lagrange  $\mathcal{L}$  [OLNSR98].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}}(q, \dot{q}) \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q}(q, \dot{q}) = Q \quad (3.1)$$

Où

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \mathcal{T}(q, \dot{q}) - \mathcal{V}(q) \quad (3.2)$$

est la fonction Lagrangienne.  $\mathcal{T}(q, \dot{q})$  est l'énergie cinétique (ou Co-énergie) fonction que nous supposons être de la forme :

$$\mathcal{T}(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (3.3)$$

Où  $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  est la matrice d'inertie généralisée qui satisfait  $D(q) = D^T(q) > 0$ .  $\mathcal{V}(q)$  est la fonction potentielle supposée bornée inférieurement par  $c \in \mathbb{R}$  telle que  $\mathcal{V}(q) \geq 0$  pour tout  $q \in \mathbb{R}^n$ .

Nous considérerons trois types de forces externes qui sont l'action des commandes, la dissipation et l'interaction du système avec son environnement. Nous supposons que les commandes varient linéairement comme  $\mathcal{M}u \in \mathbb{R}^n$ , où  $\mathcal{M} \in \mathbb{R}^{n \times m}$  est une matrice constante et  $u \in \mathbb{R}^m$  est le vecteur de commande. Les forces dissipatives sont de la forme  $-\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q})$ , où  $\mathcal{F}(\dot{q})$  est la fonction de dissipation de Rayleigh qui par définition satisfait :

$$\dot{q}^T \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q}) \geq 0 \quad (3.4)$$

Les forces externes s'écrivent :

$$Q = -\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q}) + Q_\zeta + \mathcal{M}u \quad (3.5)$$

Où  $Q_\zeta$  est un signal externe qui modélise l'effet des perturbations.

L'équation du mouvement devient alors :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}}(q, \dot{q}) \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q}(q, \dot{q}) + \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \dot{q}}(\dot{q}) = Q_\zeta + \mathcal{M}u \quad (3.6)$$

Les équations (3.2), (3.3) et (3.4) définissent un système d'Euler-Lagrange caractérisé par ses paramètres :  $\{\mathcal{T}(q, \dot{q}), \mathcal{V}(q), \mathcal{F}(\dot{q}), \mathcal{M}, Q_\zeta\}$

Plus tard, William Rowan Hamilton (1805-1865) récrivait l'équation du second ordre (3.1) en un ensemble d'équations du premier ordre en utilisant la fonction  $H(q, p) = p^T \dot{q} - \mathcal{L}(q, \dot{q})$  [Pas06].

### 3.3 Vers la représentation par ports des systèmes hamiltoniens

Pour donner la définition de base des systèmes hamiltoniens représentés par ports (Systèmes *PH*) à partir de la modélisation de réseau de ports nous commençons par un exemple simple, le système physique masse-ressort.

#### 3.3.1 Exemple démonstratif : système masse-ressort

Considérons une masse ponctuelle  $m$ , se déplaçant dans une direction, sans frottement, sous l'influence d'une force d'un ressort avec une constante de raideur  $k$ . La méthode standard de la modélisation du système est de commencer avec la configuration  $z \in \mathbb{R}$  de la masse, et d'écrire l'équation différentielle du deuxième ordre suivante :

$$m\ddot{z} = -k(z - z_0) \quad (3.7)$$

Où  $z_0$  est la longueur de repos du ressort.

De point de vue de la modélisation à base de réseau de ports, le système masse-ressort est une interconnexion de deux sous-systèmes qui stockent de l'énergie; l'énergie potentielle stockée par le ressort et l'énergie cinétique stockée par la masse en mouvement, comme le montre la figure (3.1). Pour le système de ressort, l'énergie potentielle est exprimée en

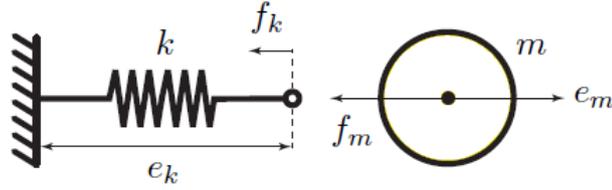


Figure 3.1: Système masse-ressort

fonction de l'allongement  $q = z - z_0$  du ressort. Dans le cas d'un ressort linéaire, cette énergie potentielle est  $\frac{1}{2}kq^2$ . Cela conduit aux équations du système suivantes :

$$\text{ressort} : \begin{cases} \dot{q} = -f_k \\ e_k = \frac{d}{dq} \left( \frac{1}{2}kq^2 \right) \end{cases} \quad (3.8)$$

Où  $-f_k$  désigne la vitesse de l'extrémité du ressort (où il est attaché à la masse) et  $e_k = kq$  désigne la force du ressort appliquée à cette extrémité.

Pour le système de la masse, nous obtenons des équations similaires en utilisant l'énergie cinétique  $\frac{1}{2m}p^2$  qui est exprimée par la quantité du mouvement  $p$  de la masse.

$$\text{masse} : \begin{cases} \dot{p} = -f_m \\ e_m = \frac{d}{dp} \left( \frac{1}{2m}p^2 \right) \end{cases} \quad (3.9)$$

Où  $-f_m$  désigne la force exercée sur la masse et  $e_m = \frac{p}{m}$  est la vitesse de la masse.

Enfin, nous couplons les deux sous-systèmes de masse et du ressort par l'élément d'interconnexion en utilisant la troisième loi de Newton (*action = -réaction*).

$$\text{interconnexion} : \begin{cases} -f_k = e_m \\ f_m = e_k \end{cases} \quad (3.10)$$

Conduisant à des équations finales pour l'ensemble, qui sont connues par *les équations hamiltoniennes* du système masse-ressort.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q}(q, p) \\ \frac{\partial H}{\partial p}(q, p) \end{bmatrix}, \quad H(q, p) = \frac{1}{2}kq^2 + \frac{1}{2m}p^2 \quad (3.11)$$

Il est évident que le système (3.11) est équivalent au modèle de deuxième ordre (3.7).

Cet exemple reflète certaines caractéristiques principales de la modélisation à base de réseau de ports. Le système est considéré comme un couplage entre les énergies stockées

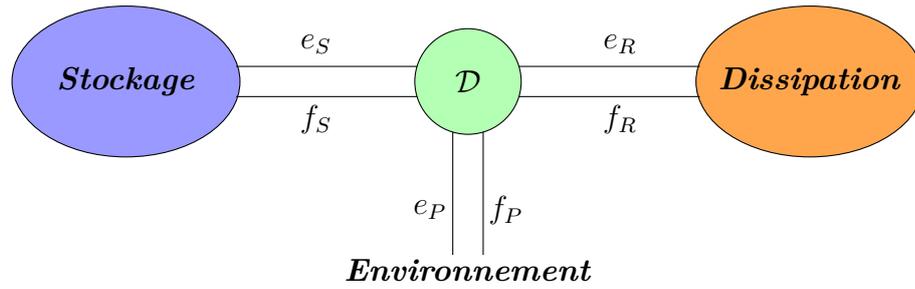


Figure 3.2: Système hamiltonien représenté par ports

dans le ressort et la masse à travers un élément d'interconnexion (conservation d'énergie) qui assure le transfert de l'énergie du système masse au système ressort et inversement.

Dans un système physique générale, l'élément d'interconnexion est remplacé par la notion géométrique de la *structure de Dirac* et en ajoutant aux éléments de stockage aussi les éléments de dissipation.

En général, dans la modélisation à base de ports, éventuellement à grande échelle, le système physique est considéré comme l'interconnexion des trois types de composants idéaux : éléments de stockage d'énergie, éléments de dissipation d'énergie et éléments de transfert (transformation) d'énergie.

Les exemples les plus simples d'éléments de stockage d'énergie sont les inductances idéales, condensateurs, masses et ressorts. Les éléments de dissipation de l'énergie sont les résistances et les amortisseurs, tandis que des exemples d'éléments de transfert d'énergie sont transformateurs et gyrateurs<sup>1</sup>.

Pour un système  $PH$ , les éléments de stockage d'énergie sont regroupés en un seul objet noté par  $\mathcal{S}$  (stockage) et de même les éléments de dissipation d'énergie sont regroupés dans un seul objet désigné par  $\mathcal{R}$  (résistif). Enfin, l'interconnexion de tous les éléments de transfert d'énergie peut être considérée comme une seule structure de transformation d'énergie notée  $\mathcal{D}$  (formalisé par la notion géométrique d'une structure de Dirac) [vdSJ14].

L'essentiel de la modélisation des systèmes hamiltoniens représentés par ports est résumé par la figure (3.2), où les éléments de stockage  $\mathcal{S}$  et de dissipation de l'énergie  $\mathcal{R}$  sont liés à la structure centrale d'interconnexion  $\mathcal{D}$ . Ces liaisons sont faites par des paires de vecteurs  $(f, e)$  de mêmes dimensions de flux et efforts. Une paire de vecteurs de variables flux et effort  $(f, e)$  est appelée un port et l'ensemble total de variables  $f, e$  est appelé l'ensemble des variables de ports.

<sup>1</sup> : Quadripôle idéal défini par les relations  $I_1 = y_1 \cdot V_2$ ,  $I_2 = -y_2 \cdot V_1$

Pour la figure (3.2), nous avons trois ports : le port  $(f_S, e_S)$  liant l'élément de stockage, le port  $(f_R, e_R)$  correspondant la dissipation d'énergie et le port externe  $(f_P, e_P)$  par lequel le système interagit avec son environnement (l'action du contrôleur est incluse). Les quantités scalaires  $e_S^T f_S$ ,  $e_R^T f_R$  et  $e_P^T f_P$  désignent les puissances instantanées transmises à travers les liaisons.

### 3.3.2 Structure de Dirac

La propriété de base d'une structure de Dirac est la *conservation de l'énergie* : la structure de Dirac relie les différentes variables de ports (flux et effort) de telle sorte que la puissance totale  $e^T f$  est égale à zéro. Pour définir la notion de structure de Dirac pour les systèmes de dimension finie, nous commençons avec un espace de variables de puissance  $\mathcal{F} \times \mathcal{F}^*$ . On appelle  $\mathcal{F}$  l'espace des flux dont les éléments sont désignés par  $f \in \mathcal{F}$  et sont appelés vecteurs de flux. L'espace des efforts est donnée par l'espace dual linéaire  $\mathcal{E} := \mathcal{F}^*$  et ses éléments sont désignés par  $e \in \mathcal{E}$ . L'espace total de variables de flux et d'effort est  $\mathcal{F} \times \mathcal{F}^*$  et sera appelé l'espace des variables de ports. Dans cet espace de variables de ports, nous définissons la puissance par :

$$P = \langle e | f \rangle, \quad (f, e) \in \mathcal{F} \times \mathcal{E} \quad (3.12)$$

Où  $\langle e | f \rangle$  désigne le produit de dualité, autrement dit, la fonction linéaire  $e \in \mathcal{F}^*$  agissant sur  $f \in \mathcal{F}$  [Pas06].

**Définition 3.1** ([vdSJ14]). *On considère un espace linéaire  $\mathcal{F}$  de dimension finie avec  $\mathcal{E} = \mathcal{F}^*$ . Un sous-espace  $\mathcal{D} \subset \mathcal{F} \times \mathcal{F}^*$  est une structure de Dirac si :*

1.  $\langle e | f \rangle = 0$ , pour tout  $(f, e) \in \mathcal{D}$
2.  $\dim \mathcal{D} = \dim \mathcal{F}$

Propriété 1 correspond à la conservation de puissance et exprime que la puissance totale dans une structure de Dirac est égale à zéro [vdS06].

**Exemple 3.1.** Soient  $\mathcal{F}$  l'espace de vitesses et  $\mathcal{F}^*$  l'espace de forces, alors  $\langle e | f \rangle$  est la puissance mécanique. De même, soient  $\mathcal{F}$  l'espace de courants et  $\mathcal{F}^*$  l'espace de tensions, alors  $\langle e | f \rangle$  est la puissance électrique.

### 3.3.2.1 Élément de stockage d'énergie

Les variables de port du stockage interne, désignées par  $(f_S, e_S)$ , sont inter-connectées et liées à la fonction de stockage du système qui est définie par une variété (manifold) d'espace d'états de dimension finie  $\mathcal{X}$  avec des coordonnées  $x$  et une fonction hamiltonienne  $H : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$  désignant l'énergie. Les variables flux  $f_S$  du stockage d'énergie sont données par le vecteur  $\dot{x}$ . En outre, les variables d'effort  $e_S$  du stockage d'énergie sont données par le vecteur  $\frac{\partial H}{\partial x}(x)$  des dérivées partielles de  $H$ . Nous obtenons la balance d'énergie suivante :

$$\frac{dH}{dt} = \langle \frac{\partial H}{\partial x}(x) \mid \dot{x} \rangle = \frac{\partial^T H}{\partial x}(x) \dot{x} \quad (3.13)$$

L'interconnexion des éléments de stockage d'énergie au port du stockage de la structure de Dirac est accomplie par :

$$\begin{aligned} f_S &= -\dot{x} \\ e_S &= \frac{\partial H}{\partial x}(x) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Par conséquent la balance d'énergie (3.13) peut être écrite également

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial^T H}{\partial x}(x) \dot{x} = -e_S^T f_S \quad (3.15)$$

### 3.3.2.2 Éléments de dissipation d'énergie

Le deuxième port interne correspond à la dissipation interne d'énergie (due à la friction, résistance, etc.), et ses variables de port sont désignées par  $(f_R, e_R)$ . Ces variables de port se terminent dans une relation résistive statique  $\mathcal{R}$ . En général, une relation résistive est un sous-ensemble  $\mathcal{R} \subset \mathcal{F}_R \times \mathcal{E}_R$  avec la propriété que :

$$\langle e_R \mid f_R \rangle = e_R^T f_R \leq 0 \quad (3.16)$$

Puisque la structure de Dirac d'un système  $PH$  (sans port externe) satisfait la balance d'énergie :

$$e_S^T f_S + e_R^T f_R = 0 \quad (3.17)$$

Ce qui conduit par substitution des équations (3.13) et (3.16) à :

$$\frac{dH}{dt} = -e_S^T f_S = e_R^T f_R \leq 0 \quad (3.18)$$

Un cas particulier important des relations de dissipation d'énergie entre  $f_R$  et  $e_R$  se produit lorsque la relation résistive peut être exprimée comme un plan d'entrée-sortie

$$f_R = -F(e_R) \quad (3.19)$$

Dans plusieurs cas, le plan  $F$  est une dérivée d'une fonction dite la fonction de dissipation de *Rayleigh*;  $D_R : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$  où  $F(e_R) = \frac{\partial D_R}{\partial e_R}(e_R)$ .

Pour les éléments résistifs linéaire, (3.19) devient alors :

$$f_R = -Re_R \quad (3.20)$$

Pour certaines matrices symétriques semi-définies positives  $R = R^T \geq 0$ .

### 3.3.2.3 Ports externes

Le port externe  $(f_P, e_P)$  modélise l'interaction du système avec son environnement. Ceci comprend des différentes situations, les ports qui sont accessibles par l'action du contrôleur. Un autre type de ports externes correspond à un port d'interaction. Encore un autre type de ports externes correspondant aux sources. Par exemple, dans un circuit électrique, la variable d'entrée est la tension de la source, tandis que le courant à travers la source est la variable de sortie.

Prenant en compte le port externe, l'équation de la balance d'énergie (3.17) s'étend au :

$$e_S^T f_S + e_R^T f_R + e_P^T f_P = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{dH}{dt} = -e_S^T f_S = e_R^T f_R + e_P^T f_P \leq e_P^T f_P \quad (3.22)$$

Cette inégalité exprime que l'augmentation de l'énergie stockée du système (le hamiltonien  $H$ ) est toujours inférieure ou égale à la puissance fournie de l'extérieur.

### 3.3.2.4 Exemple d'un moteur à courant continu

L'entraînement d'un moteur à courant continu en charge est présenté par la figure (3.3). On distingue une interaction entre deux domaines d'énergie, électromagnétique et mécanique. Il est possible de reconnaître les éléments suivants :

1. *Éléments de stockage* : l'inductance  $L$ , avec sa variable d'état  $\phi$  et le moment d'inertie  $J$ , sa variable d'état est la quantité du mouvement angulaire  $p$

2. *Éléments de dissipation* : la résistance  $R$  et l'amortisseur  $b$  qui modélise le frottement visqueux de la charge.
3. *Sources* : source de tension (effort)  $u$ .
4. *Gyrateur* : un gyrateur  $k$ .

Alors, il est possible d'écrire le modèle mathématique de chaque élément relatif aux stockage d'énergie (les éléments sont supposés linéaires) par :

$$\text{Inertie} : \begin{cases} -\dot{p} = C_J = J \frac{\omega}{dt} \\ \omega = \frac{\partial E_J}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{p^2}{2J} \right) = \frac{p}{J} \end{cases}$$

$$\text{Inductance} : \begin{cases} -\dot{\phi} = u_L = L \frac{i}{dt} \\ i = \frac{\partial E_\phi}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\phi^2}{2L} \right) = \frac{\phi}{L} \end{cases}$$

Par conséquent, l'hamiltonien total correspondant est  $H(p, \phi) = \frac{1}{2L}\phi^2 + \frac{1}{2J}p^2$ . Avec  $C_J =$  est le couple appliqué à la charge. Pour les éléments de dissipation :

$$\text{résistance} : u_R = -Ri; \quad \text{amortisseur} : C_b = -b\omega$$

Avec  $C_b$  est le couple dû au frottement et  $R, b > 0$ . De plus, les équations du gyrateur sont données par :  $C_e = ki, e_{mot} = -k\omega$ .

Avec  $C_e$  est le couple électromagnétique généré par le moteur à courant continu. Finalement, les deux sous-systèmes sont inter-connectés par les équations suivantes :

$$u + u_R + u_L + e_{mot} = 0 \text{ et } C_J + C_b + C_e = 0$$

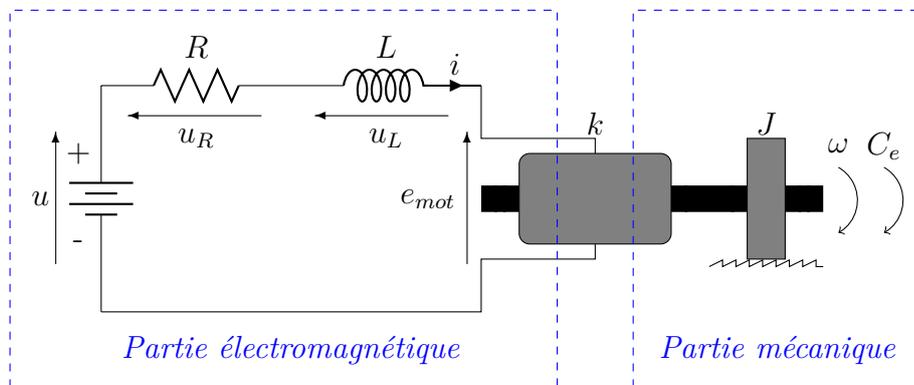


Figure 3.3: Entraînement d'un moteur à courant continu

Nous obtenons le modèle du système  $PH$  :

$$\begin{cases} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{p} \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & k \\ -k & 0 \end{bmatrix}}_{\mathcal{J}} - \underbrace{\begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix}}_{\mathcal{R}} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial \phi}(\phi, p) \\ \frac{\partial H}{\partial p}(\phi, p) \end{bmatrix}}_{\nabla H} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{g(x)} \underbrace{u}_u \\ \underbrace{i}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_{g^T(x)} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial \phi}(\phi, p) \\ \frac{\partial H}{\partial p}(\phi, p) \end{bmatrix}}_{\nabla H} \end{cases} \quad (3.23)$$

### 3.3.2.5 Représentations des structures de Dirac

Il existe différentes représentations de structures de Dirac. Ces représentations sont données en terme de certaines matrices structurelles.

Représentation de noyau et d'image [BMS11] : chaque structure de Dirac  $\mathcal{D} \subset \mathcal{F} \times \mathcal{F}^*$  peut être représentée par la représentation de noyau comme suit :

$$\mathcal{D} = \{(f, e) \in \mathcal{F} \times \mathcal{F}^* \mid Ff + Ee = 0\} \quad (3.24)$$

Pour un plan linéaire  $F : \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{V}$  et  $E : \mathcal{F}^* \rightarrow \mathcal{V}$  satisfaisant :

$$\begin{aligned} EF^* + FE^* &= 0 \\ \text{rang}(F + E) &= \dim \mathcal{F} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Où  $\mathcal{V}$  est un espace linéaire avec mêmes dimensions de  $\mathcal{F}$ ,  $F^* : \mathcal{V}^* \rightarrow \mathcal{F}^*$  et  $F$ ,  $E^* : \mathcal{V}^* \rightarrow \mathcal{F}^{**} = \mathcal{F}$  sont les plans adjoints de  $F$  et  $E$  respectivement.

Il résulte de l'équation (3.25) que  $\mathcal{D}$  peut être écrite aussi par une représentation d'image comme :

$$\mathcal{D} = \{(f, e) \in \mathcal{F} \times \mathcal{F}^* \mid f = E^* \lambda, e = F^* \lambda, \lambda \in \mathcal{V}^*\} \quad (3.26)$$

Les matrices des représentations de noyau et d'image sont obtenues en choisissant les coordonnées linéaires pour  $\mathcal{F}$ ,  $\mathcal{F}^*$  et  $\mathcal{V}$ . En effet, prendre  $f_1, \dots, f_n$  pour  $\mathcal{F}$  et  $e_1 = f_1^*, \dots, e_n = f_n^*$  pour son dual  $\mathcal{F}^*$ , où  $\dim \mathcal{F} = n$ . De plus, prendre un ensemble de coordonnées linéaire pour  $\mathcal{V}$ . Alors, les plans linéaires  $F$  et  $E$  représentés par des matrices de  $n \times n$  (qu'on les désigne par les mêmes symboles des plans) satisfaisant :

$$\begin{aligned} EF^T + FE^T &= 0 \\ \text{rang}[F|E] &= \dim \mathcal{F} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Les structures de Dirac peuvent être aussi représentées par la représentation entrée-sortie hybride [GBMvdS00], la représentation entrée-sortie contrainte et la représentation par les coordonnées canoniales [Pas06].

### 3.4 Systèmes dissipatifs et passifs

La dissipativité et son cas particulier, la passivité, fournissent une interprétation physique utile des problèmes de la stabilité et la stabilisation car elle établit une relation entre l'énergie injectée et celle dissipée par un système. Plusieurs ouvrages et articles étudient la dissipativité, les concepts de la passivité, les conditions suffisantes liées à la stabilité et la conception des contrôleurs basés sur la passivité [NS13].

Dans cette section, il est nécessaire de présenter les définitions de base de la dissipativité et la passivité des systèmes non linéaires. Considérons un système non linéaire affine décrit par l'ensemble des équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.28)$$

Où  $x \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$  est la variable d'état,  $u \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^m$  et  $y \in \mathcal{Y} \subset \mathbb{R}^p$  sont les variables d'entrée et de sortie, respectivement. De plus, nous supposons que  $f$ ,  $g$  et  $h$  sont des fonctions lisses et que  $f$  admet au moins un point d'équilibre  $x_*$ . Supposons que  $x_* = 0$ , alors  $f(0) = 0$  et que  $h(0) = 0$ . Enfin, notons par  $\Phi(t, x_0, u)$  l'évolution de l'état  $x(t)$  du (3.28) lorsque l'état initial est  $x(0) = x_0$  et la fonction d'entrée est  $u$ ; clairement,  $y(t) = h(\Phi(t, x_0, u))$  est la sortie correspondante.

**Définition 3.2 (supply rate).** Une fonction  $w : \mathcal{U} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{R}$  est une fonction de cadence d'approvisionnement (supply rate) du système (3.28) si et seulement si pour toutes  $u \in \mathcal{U}$  et toutes  $x_0 \in \mathcal{X}$  nous avons que

$$\int_0^t w(u(\tau), y(\tau)) d\tau < +\infty, \quad \forall t \geq 0 \quad (3.29)$$

Où  $y(t) = h(\Phi(t, x_0, u))$ .

**Définition 3.3 (système dissipatif).** Considérons un système (3.28) et notons par  $w$  la fonction de cadence d'approvisionnement. Puis, (3.28) est dissipatif si et seulement s'il

existe une fonction non négative  $\mathcal{C}^0$ , appelée fonction de stockage  $V : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ , telle que pour toutes  $x_0 \in \mathcal{X}$ ,  $u \in \mathcal{U}$  et  $t \geq 0$  :

$$V(x) - V(x_0) \leq \int_0^t w(\tau) d\tau \quad (3.30)$$

Où  $w(t) := \langle y(t), u(t) \rangle = y^T(t)u(t)$ . La relation précédente est appelée l'inégalité de dissipation.

**Définition 3.4 (système passif).** Le système (3.28) est passif si et seulement s'il est dissipatif avec une fonction de cadence d'approvisionnement  $w = y^T u$  et la fonction de stockage vérifiant  $V(0) = 0$  et :

$$V(x) - V(x_0) \leq \int_0^t y^T(\tau)u(\tau) d\tau \quad (3.31)$$

Pour toutes  $x_0 \in \mathcal{X}$ ,  $u \in \mathcal{U}$  et  $t \geq 0$ . De cette façon, il est plus facile d'en déduire que la fonction de stockage est décroissante au long des trajectoires du système non forcé ( $u = 0$ ); c-à-d,  $V(x) - V(x_0) \leq 0$ ,  $\forall x_0 \in \mathcal{X}$ ,  $t \geq 0$ .

Alors, les systèmes passifs avec une fonction de stockage définie positive sont stables au sens de Lyapunov. En outre, les systèmes qui sont compatibles avec la condition  $y = 0$ , avec une fonction de stockage décroissante ont une dynamique des zéros stable au sens de Lyapunov.

**Définition 3.5 (système sans pertes).** Le système (3.28) est sans pertes si et seulement s'il est passif avec une fonction de stockage  $V$  et :

$$V(x) - V(x_0) = \int_0^t y^T(\tau)u(\tau) d\tau \quad (3.32)$$

Pour toutes  $x_0 \in \mathcal{X}$ ,  $u \in \mathcal{U}$  et  $t \geq 0$ .

## 3.5 Commande basée sur la passivité des systèmes hamiltoniens représentés par ports

Le système non linéaire (3.28) peut être représenté par la structure hamiltonienne en fonction du gradient de la fonction d'énergie et s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathcal{J}(x) - \mathcal{R}(x)]\nabla H(x) + g(x)u \\ y = g^T(x)\nabla H(x) \end{cases} \quad (3.33)$$

Où  $x \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$  est la variable d'état,  $u \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^m$  et  $y \in \mathcal{Y} \subset \mathbb{R}^p$  sont les variables d'entrée et de sortie, respectivement.  $\mathcal{J}(x) = -\mathcal{J}^T(x)$  est une matrice anti-symétrique de dimension  $n \times n$  représentant les interconnexions entre les états et  $\mathcal{R}(x) = \mathcal{R}^T(x) \geq 0$  pour toutes  $x \in \mathcal{X}$  est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.  $H(x)$  est la fonction de stockage du système.

La relation entre le système (3.33) et les systèmes passifs peut être résumée par l'intermédiaire de la proposition suivante.

**Proposition 3.1.** *Chaque système PH est passif et le hamiltonien  $H$  est la fonction de stockage.*

**Démonstration :** la balance d'énergie du système (3.33) est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{H}(x) &= \frac{\partial^T H(x)}{\partial x} \dot{x} \\ &= \frac{\partial^T H(x)}{\partial x} ([\mathcal{J}(x) - \mathcal{R}(x)]\nabla H(x) + g(x)u) \\ &= -\frac{\partial^T H(x)}{\partial x} \mathcal{R}(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} + y^T u \leq y^T u \end{aligned} \quad (3.34)$$

Ensuite, par intégration il est possible de déduire:

$$\underbrace{H(x(t)) - H(x(0))}_{\text{Énergie stockée}} = - \underbrace{\int_0^t \frac{\partial^T H(x(\tau))}{\partial x} \mathcal{R}(x(\tau)) \frac{\partial H(x(\tau))}{\partial x} d\tau}_{\text{Énergie dissipée } d(t) \geq 0} + \underbrace{\int_0^t y^T(\tau)u(\tau)d\tau}_{\text{Énergie apportée}} \quad (3.35)$$

Une propriété dynamique importante des systèmes hamiltoniens est l'existence de (dynamical invariants) indépendants de l'hamiltonien  $H(x)$  du système, appelé fonctions de Casimir [SCH00]. Pour invariants dynamiques, l'ensemble d'équations aux dérivées partielles qui suit est considéré :

$$\frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} \mathcal{J}(x) = 0, \quad x \in \mathcal{X} \quad (3.36)$$

dans la fonction inconnue  $\mathcal{C} : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ . Si (3.36) a une solution  $\mathcal{C}$ , puis la dérivée dans le temps au long du système PH satisfait :

$$\frac{d\mathcal{C}}{dt} = \frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} \mathcal{J}(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} + \frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} g(x)u = \frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} g(x)u \quad (3.37)$$

Pour l'entrée  $u = 0$  ou pour les entrées arbitraires si aussi  $\frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} g(x)u = 0$  la fonction  $\mathcal{C}(x)$  reste constante au long de la trajectoire du système PH. Une fonction  $\mathcal{C}(x)$  satisfaisant

(3.36) est appelée une fonction de Casimir. Pour les systèmes  $PH$  avec dissipation, les fonctions  $\mathcal{C} : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$  satisfaisant l'ensemble d'équations :

$$\frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} [\mathcal{J}(x) - \mathcal{R}(x)] = 0, \quad x \in \mathcal{X} \quad (3.38)$$

sont considérées, qui doivent être égales à :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} \mathcal{J}(x) &= 0 \\ \frac{\partial^T \mathcal{C}(x)}{\partial x} \mathcal{R}(x) &= 0 \end{aligned} \quad (3.39)$$

Une fonction  $\mathcal{C}(x)$  satisfaisant (3.38) est une fonction de Casimir pour les deux structures géométriques définies par  $\mathcal{J}(x)$  et  $\mathcal{R}(x)$ .

Une conséquence importante de l'existence des fonctions de Casimir est que si  $\mathcal{C}_1(x)$ ,  $\mathcal{C}_2(x)$ ,  $\dots$ ,  $\mathcal{C}_r(x)$  sont des fonctions de Casimir, alors non seulement  $\frac{dH}{dt}(x) = 0$  pour  $u = 0$ , mais aussi :

$$\frac{d}{dt}(H + H_a(\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \dots, \mathcal{C}_r))(x(t)) = 0 \quad (3.40)$$

Pour toute fonction  $H_a(x) : \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}$ . Cela signifie que même si  $H(x)$  est non définie positive à un point d'équilibre  $x_*$ , la fonction  $H(x) + H_a(\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \dots, \mathcal{C}_r)(x)$  est peut-être définie positive au point d'équilibre en choisissant de manière appropriée  $H_a(x)$  et peut donc servir comme une fonction de Lyapunov candidate à l'analyse de la stabilité. Cette méthode est appelée la méthode "*Energy-Casimir*" et elle a de nombreuses applications dans la commande des systèmes  $PH$  [Spr12].

### 3.5.1 Passivité standard et balance d'énergie

Si le système  $PH$  en boucle ouverte satisfaisant à l'équation de la balance d'énergie (3.35). En introduisant par exemple la commande  $u = \beta(x) + v$  [OVDSME02], le système  $PH$  doit être satisfait à la nouvelle équation de la balance d'énergie.

$$H_d(x(t)) - H_d(x(0)) = \int_0^t y'^T(\tau)v(\tau)d\tau - d_d(t) \quad (3.41)$$

Où  $H_d(x)$  est la fonction d'énergie désirée ayant un minimum au point d'équilibre  $x_*$ ,  $y'$  est la nouvelle sortie passive (qui peut être égale à  $y$ ) et  $d_d(t) \geq 0$  est la dissipation désirée pour augmenter le taux de convergence.

Pour développer le contrôleur, il faut prendre en considération deux étapes :

1. Définition d'une fonction  $H_d$  appropriée avec un minimum au point d'équilibre. Cette procédure peut être généralisée afin de modifier aussi la structure d'interconnexion (la matrice  $\mathcal{J}(x)$ ) du système pour ajouter un couplage (virtuel) entre les parties non inter-actionnées du système.
2. Modification des effets de dissipation (injection d'amortissements) afin d'augmenter les performances (modification convenable de la matrice  $\mathcal{R}(x)$ ).

Supposons qu'il est possible d'exprimer l'énergie fournie par le contrôleur en fonction des état du système : telle que  $\beta : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ . Alors :

$$-\int_0^t y^T(\tau)\beta(x(\tau))d\tau = H_a(x(t)) - H_a(x(0)) \quad (3.42)$$

Et le contrôleur  $u = \beta(x) + v$  assure que le système en boucle fermée est passif avec la fonction d'énergie donnée par :

$$H_d(x) = H(x) + H_a(x) \quad (3.43)$$

Par la combinaison des équations (3.35), (3.42) et (3.43), on peut obtenir que :

$$H(x(t)) - H(x(0)) - \int_0^t y^T(\tau)[\beta(x(\tau)) + v(\tau)]d\tau = -d(t)$$

$$H_d(x(t)) - H_d(x(0)) - \int_0^t y^T(\tau)v(\tau)d\tau = -d(t)$$

Et par conséquent :

$$H_d(x(t)) - H_d(x(0)) = \int_0^t y^T(\tau)v(\tau)d\tau - d(t) \quad (3.44)$$

Le problème de régulation sera résolu s'il est possible de choisir une fonction  $H_a$  de telle sorte que  $H_d$  a un minimum à l'équilibre désiré  $x_*$ .

### 3.5.2 Commande par injection d'amortissements

Dans cette commande, la stabilité asymptotique en boucle fermée est achevée par l'injection d'amortissements dans la sortie passive  $y$  par :

$$u = -K(x)y \quad (3.45)$$

Avec  $K(x) > 0$ ,  $K \in \mathbb{R}^m$  est une matrice d'amortissements telle que la dynamique du système en boucle fermée est caractérisé par :

$$\dot{x} = [\mathcal{J}(x) - \mathcal{R}_d(x)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} \quad (3.46)$$

Avec  $\mathcal{R}_d(x) = \mathcal{R}(x) + g(x)K(x)g^T(x)$  est la matrice d'amortissements désirée du système en boucle fermée. Cependant, la stabilisation par injection d'amortissements est applicable uniquement si la fonction de stockage  $H(x)$  a un minimum au point d'équilibre désiré.

### 3.5.3 Commande par interconnexion

Considérons un système  $PH$  donné par (3.33) contrôlé par un contrôleur de structure  $PH$  dont sa forme est [SCH00] :

$$\begin{cases} \dot{\xi} = [\mathcal{J}_C(\xi) - \mathcal{R}_C(\xi)]\nabla H_C(\xi) + g_C(x)u_C \\ y_C = g_C^T(\xi)\nabla H_C(\xi) \end{cases} \quad (3.47)$$

Où  $\xi \in \mathcal{X}_C$  est la variable d'état,  $u_C \in \mathcal{U}_C$  et  $y_C \in \mathcal{Y}_C$  sont, respectivement, les variables d'entrée et de sortie,  $H_C : \mathcal{X}_C \rightarrow \mathbb{R}$  est la fonction d'énergie,  $\mathcal{J}_C(\xi) = -\mathcal{J}_C^T(\xi)$  et  $\mathcal{R}_C(\xi) = \mathcal{R}_C^T(\xi) \geq 0, \forall \xi \in \mathcal{X}_C$ , sont les matrices d'interconnexions et d'amortissements.

L'idée de base est d'interconnecter les systèmes (3.33) et (3.47) en respectant la conservation d'énergie et façonner l'énergie en boucle fermée en définissant correctement l'hamiltonien  $H_C$  du contrôleur afin d'introduire un minimum global dans la configuration d'équilibre souhaitée.

Avec l'interconnexions des deux systèmes, nous avons :

$$\begin{cases} u = -y_C + v \\ u_C = y + v_C \end{cases}$$

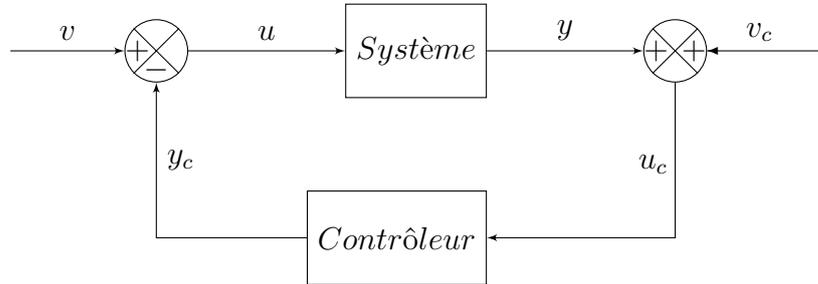


Figure 3.4: Contrôle par interconnexions d'un système  $PH$  par un contrôleur de structure  $PH$

Où  $v, v_C$  sont les entrées externes, le système en boucle fermée suivant est obtenu :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{J}(x) - \mathcal{R}(x) & -g(x)g_C^T(\xi) \\ g_C(\xi)g^T(x) & \mathcal{J}_C(\xi) - \mathcal{R}_C(\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H(x)}{\partial x} \\ \frac{\partial H(\xi)}{\partial \xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g(x) & 0 \\ 0 & g_C(\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ v_C \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y \\ y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g^T(x) & 0 \\ 0 & g_C^T(\xi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H(x)}{\partial x} \\ \frac{\partial H(\xi)}{\partial \xi} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.48)$$

Il est important de noter qu'il n'y a pas de relation entre les états de la commande (le contrôleur) et les états du système à contrôler. Il est intéressant de chercher les fonctions de Casimir  $\mathcal{C}_i : \mathcal{X} \times \mathcal{X}_C \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $i = 1, \dots, n_C = \dim \mathcal{X}_C$ , du système en boucle fermée, qui relie les variables d'état des deux systèmes.

$$\Omega := \{(x, \xi) \in \mathcal{X} \times \mathcal{X}_C \mid \xi = S(x) + k\} \quad (3.49)$$

Où  $k$  est déterminé par le contrôleur et  $S(x)$  est une fonction reste à déterminer. Alors :

$$H_d = H(x) + H_C[S(x)] \quad (3.50)$$

Qui est peut être façonnée par la sélection de  $H_C(\xi)$ . Il faut trouver  $S$  qui rend la fonction  $\Omega$  invariante, c-à-d,  $\frac{d\mathcal{C}}{dt} \equiv 0$  ( $\mathcal{C}$  : fonction de Casimir) [OG03], où :

$$\mathcal{C}_i(x, \xi) = S_i(x) - \xi_i \quad (3.51)$$

Est la fonction invariante candidate.

### 3.5.4 Assignment d'interconnexion et d'amortissement IDA-PBC

La méthode *IDA-PBC* est une procédure très intéressante pour la commande des systèmes physiques. L'idée de base de cette technique [OVDSME02] est de, en conservant la structure *PH* du système avec dissipation, assigner la fonction de l'énergie en boucle fermée en modifiant les matrices d'interconnexions et d'amortissements. Autrement dit, la dynamique désirée du système a une forme *PH*.

**Proposition 3.2** ([OGC04]). *Soit le système non linéaire décrit par (3.28), que l'on veut stabiliser autour d'un point d'équilibre  $x_* \in \mathbb{R}^n$ . Supposons l'existence des matrices suivantes :  $g^\perp(x)$  est l'annulateur gauche de  $g(x)$  telle que  $g^\perp(x)g(x) = 0$ ,  $\mathcal{J}_d(x) = -\mathcal{J}_d^T(x)$ ,*

$\mathcal{R}_d(x) = \mathcal{R}_d^T(x) \geq 0$  comme étant les matrices d'interconnexions et d'amortissements désirées ainsi que la fonction d'énergie désirée  $H_d(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$  qui a son minimum au point d'équilibre désiré, ainsi :

$$x_* = \arg \min H_d(x)$$

Le système (3.28) en boucle fermée a la forme PH suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = [\mathcal{J}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)]\nabla H_d(x) \\ y = g^T(x)\nabla H_d(x) \end{cases} \quad (3.52)$$

Avec la commande  $u$ , telle que :

$$u = [g^T(x)g(x)]^{-1}g^T(x)\{[\mathcal{J}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)]\nabla H_d(x) - f(x)\} \quad (3.53)$$

Il est asymptotiquement stable si,  $x_*$  est un minimum isolé de  $H_d(x)$  et que le plus grand ensemble invariant du système en boucle fermée (3.52) contenu dans :

$$\{x_* \in \mathbb{R}^n \mid \nabla H_d^T(x) \mathcal{R}_d(x) \nabla H_d(x) = 0\} \quad (3.54)$$

est égale à  $x_*$ . La stabilité est globale si  $H_d$  est radialement non bornée.

**Démonstration :** En identifiant les parties droites de (3.28) et (3.52), l'équation suivante est obtenue:

$$f(x) + g(x)u = [\mathcal{J}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)]\nabla H_d(x) \quad (3.55)$$

En multipliant (3.55) à gauche par  $g^\perp(x)$ , on obtient l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$g^\perp(x)f(x) = g^\perp(x)[\mathcal{J}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)]\nabla H_d(x) \quad (3.56)$$

L'expression de la commande est obtenue en multipliant (3.55) à gauche par la pseudo-inverse de  $g(x)$ . Le fait d'écrire le système (3.28) en boucle fermée sous la forme (3.52) avec  $\mathcal{J}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$  ayant les propriétés décrites précédemment suffit pour prouver la stabilité autour du point  $x_*$ . En effet :

$$\begin{aligned} \dot{H}_d(x) &= \nabla H_d^T \dot{x} \\ &= \nabla H_d^T [\mathcal{J}_d(x) - \mathcal{R}_d(x)] \nabla H_d(x) \\ &= -\nabla H_d^T \mathcal{R}_d(x) \nabla H_d(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.57)$$

Ainsi,  $H_d$  joue le rôle de la fonction de Lyapunov. La stabilité asymptotique suit immédiatement en utilisant le principe d'invariance de LaSalle [BADCFC06] et la condition (3.54).

La méthode standard pour résoudre (3.55) est de fixer les matrices  $\mathcal{J}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$  (d'où vient le nom *IDA*), puis résoudre les équations aux dérivées partielles (*EDP*) où l'inconnue est la fonction d'énergie désirée  $H_d(x)$ . En générale, la résolution des *EDP* est une tâche très complexe, qui peut être en quelque sorte facilitée par un choix judicieux de  $\mathcal{J}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$ . La deuxième méthode est de fixer la fonction d'énergie désirée  $H_d(x)$  et laisser libres les matrices désirées  $\mathcal{J}_d(x)$  et  $\mathcal{R}_d(x)$ . Dans ce cas, il faut résoudre des équations algébriques dans lesquelles les inconnues sont les matrices désirées d'interconnexions et d'amortissements qui doivent avoir les propriétés décrites dans la proposition (3.2).

Les techniques *IDA-PBC* ont été appliquées à une large classe de systèmes physiques, qui inclut des applications mécaniques [OSGEB02], électriques [GFG05, ROE01] et électromécaniques [RO03].

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les propriétés des systèmes physiques interconnectés, dans le cadre de la représentation hamiltonienne (*PH*), telles que l'interconnexion, le stockage et la dissipation. De plus, nous avons défini la notion de la passivité qui est la propriété la plus importante des systèmes *PH* avec dissipation et présenté les différentes commandes basées sur la passivité. Dans le chapitre qui suit, nous allons appliquer une des approches de la commande par passivité *IDA-PBC* sur différents systèmes hybrides.

# *Gestion de l'Énergie des Sources Hybrides*

## *par Logique Floue et PBC*

---

4.1	Introduction . . . . .	72
4.2	Contrôle par la logique floue . . . . .	72
4.2.1	Interface de fuzzification . . . . .	72
4.2.2	Base de règles du système . . . . .	73
4.2.3	Machine d'inférence floue . . . . .	73
4.2.4	Interface de défuzzification . . . . .	73
4.3	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/SC sans filtre . . . . .	74
4.3.1	Fonction d'énergie . . . . .	75
4.3.2	Représentation PCH du système bouclé . . . . .	76
4.3.3	Loi de commande de IDA-PBC . . . . .	77
4.3.4	Résultats de simulation . . . . .	79
4.4	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/SC avec filtre . . . . .	84
4.4.1	Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC . . . . .	85
4.4.2	Résultats de Simulation . . . . .	87
4.5	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/Batterie . . . . .	92
4.5.1	Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC . . . . .	94
4.5.2	Résultats de Simulation . . . . .	96
4.6	Gestion de l'énergie de la source hybride FC/Batterie/SC . . . . .	100
4.6.1	Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC . . . . .	101
4.6.2	Résultats de simulation . . . . .	104
4.7	Conclusion . . . . .	116

---

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va introduire la commande basée sur la passivité et la logique floue dédiés aux différentes sources hybrides étudiées auparavant; où la pile à combustible est la source principale et une batterie et/ou un supercondensateur est une source secondaire; en contrôlant la tension du bus continu à travers la commande des convertisseurs DC/DC.

## 4.2 Contrôle par la logique floue

On peut représenter un système de type MISO ou MIMO (*Multi-Inputs Single-Output* ou *Multi-Inputs Multi-Outputs*) par l'approche de Mamdani qui nous donne un système flou où les entrées sont la quantité d'hydrogène ( $QH_2$ ), l'état de charge du supercondensateur ( $SoC_{SC}$ ) et l'état de charge de la batterie ( $SoC_B$ ) et les sorties sont les courants de référence désirés des sources secondaires (batterie et/ou supercondensateur)  $\bar{I}_{SC}$  et/ou  $\bar{I}_B$ ; ces courants de référence sont utilisés dans la PBC, comme le montre la figure (4.1).

### 4.2.1 Interface de fuzzification

La fuzzification a pour rôle la conversion d'une grandeur physique en une grandeur linguistique. Il s'agit d'une projection de la variable physique sur les ensembles flous la caractérisant. Cette opération permet d'avoir une mesure précise sur le degré d'appartenance de la variable d'entrée à chaque ensemble flou. Pour chaque variable d'entrée et de sortie sélectionnée, nous définissons deux ou plusieurs fonctions d'appartenance (*membership functions* ( $MF$ )), généralement trois, mais peuvent être plus. Nous devons définir une catégorie qualitative pour chacune d'entre eux, par exemple : faible, moyenne ou élevée. Souvent les formes triangulaires et trapézoïdales sont les plus utilisées comme des fonctions d'appartenance, bien qu'il n'existe pas de règles précises sur ce choix.

Dans le cadre de cette thèse, l'état de charge du supercondensateur ou de la batterie ( $SoC$ ) est classé en trois statuts différents appelés  $SoC(Bas)$ ,  $SoC(Moy)$  et  $SoC(Haut)$ . De même, la quantité d'hydrogène est attribué en trois régions  $QH_2(Bas)$ ,  $QH_2(Moy)$  et  $QH_2(Haut)$ .

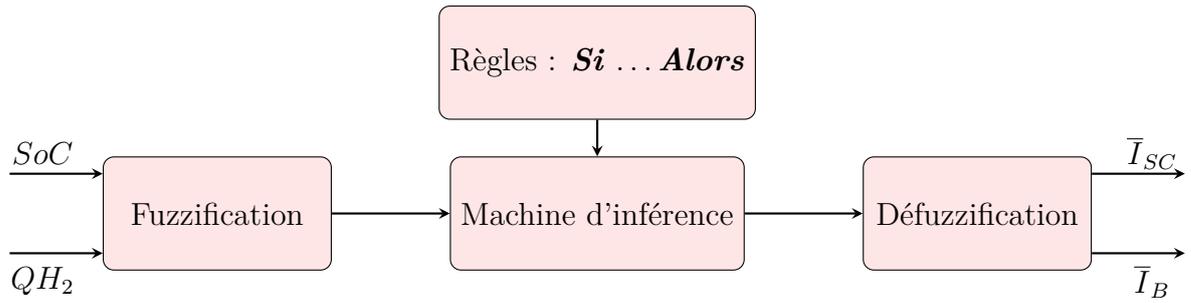


Figure 4.1: Schéma explicatif de la logique floue

## 4.2.2 Base de règles du système

La base de règles floues est un ensemble de règles linguistiques définies avec la condition (*Si... Alors...*). Les règles de nombre  $M$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) sont représentées par la condition suivante [KEK10] :

$$\text{Règle } j : \mathbf{Si} \ x_1 \text{ est } A_1^j \text{ et } x_2 \text{ est } A_2^j \text{ et } \dots \text{ et } x_n \text{ est } A_n^j \mathbf{ Alors } y \text{ est } B^j \quad (4.1)$$

Où  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) sont les paramètres d'entrée de la logique floue et la variable de sortie est notée  $y$ . Les fonctions d'appartenance  $\mu_{SoC_i^j}(x_i)$  et  $\mu_{QH_2_i^j}(x_i)$  sont représentées comme un terme d'entrée linguistique  $A_i^j$ .  $B^j$  est un terme linguistique pour la sortie floue [MBA<sup>+</sup>13].

## 4.2.3 Machine d'inférence floue

La machine d'inférence floue est une logique de prise de décision qui convertit les différentes entrées fuzzifiées en sorties floues selon la base de règles. Dans notre système, la sortie floue est décidée par les règles assignées pour  $SoC$  et  $QH_2$ .

## 4.2.4 Interface de défuzzification

la défuzzification est la transformation d'une information floue en une information déterminée (concrétisation). Les valeurs obtenues, lors de la combinaison des règles appliquées aux intervalles flous de la variable de sortie, définissent une fonction d'appartenance. Il s'agit de convertir cette information en des grandeurs déterminées (non floues ou nettes). Parmi les stratégies de défuzzification, on cite la méthode du centre de gravité, la méthode du maximum et la méthode de la moyenne des maximums.

### 4.3 Gestion de l'énergie de la source hybride FC/SC sans filtre

Pour appliquer les commandes adoptées, nous avons éliminé le filtre  $L, C$  pour simplifier le modèle de la source hybride à cinq variables d'état [MBA+13]. Le vecteur d'espace d'état à l'équilibre est :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5]^T \quad (4.2)$$

À l'équilibre, le système de l'équation (2.30) devient :

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{L_{FC}}[-\bar{\mu}_1 \bar{x}_2 + V_{FC}] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{C_{DL}}[\bar{\mu}_1 \bar{x}_1 + \bar{\mu}_2 \bar{x}_4 - \bar{x}_5] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{C_{SC}}[-\bar{x}_4] \\ \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_{SC}}[-\bar{\mu}_2 \bar{x}_2 + \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_5 = \frac{1}{L_L}[\bar{x}_2 - R_L \bar{x}_5 - E_L] \end{cases} \quad (4.3)$$

Après des simples calculs, nous définissons :

$$\bar{x} = [\bar{I}_{FC}, V_d, \bar{V}_{SC}, \bar{I}_{SC}, \frac{V_d - E_L}{R_L}]^T \quad (4.4)$$

La figure (4.2) montre la structure globale de la commande de notre système hybride où la pile à combustible et les éléments de stockage (Batterie et/ou Supercondensateurs) alimentent la charge et la récupération de l'énergie se fait par les éléments de stockage. Dans la structure hybride Pile à combustible et supercondensateurs, le courant du supercondensateurs désiré  $\bar{I}_{SC}$  est déterminé par le contrôleur flou en fonction de l'état de charge de supercondensateurs  $SoC_{SC}$  et la quantité d'hydrogène  $QH_2$ .

À partir du système (4.3), nous obtenons :

$$\begin{cases} \bar{\mu}_1 = \frac{1}{V_d}(V_{FC} - L_{FC} \dot{\bar{x}}_1) \\ \bar{\mu}_2 = \frac{1}{V_d}(\bar{x}_3 - L_{SC} \dot{\bar{x}}_4) \end{cases} \quad (4.5)$$

Où

$$\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2]^T = [(1 - \bar{U}_{FC}), (1 - \bar{U}_{SC})]^T \quad (4.6)$$

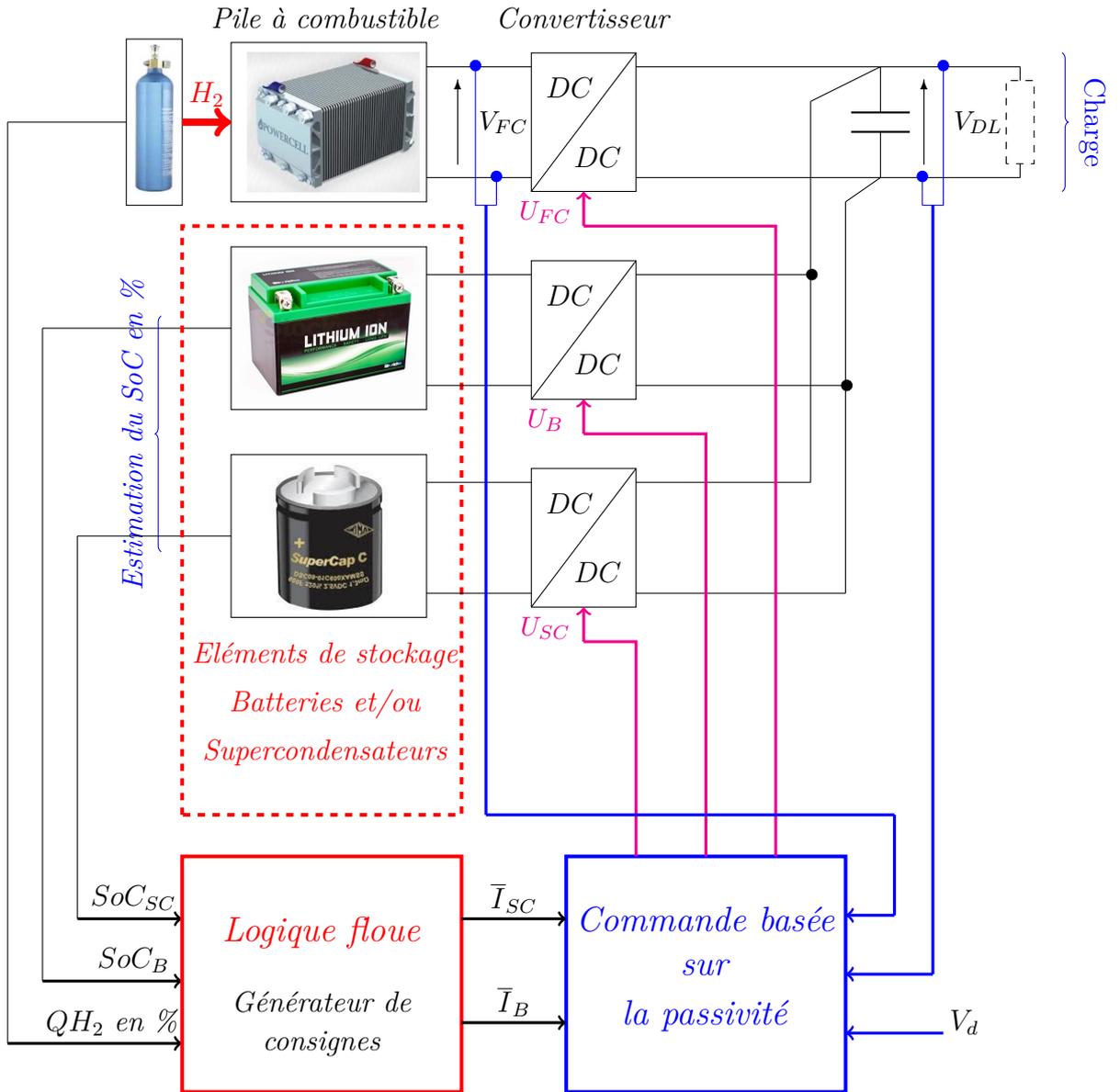


Figure 4.2: Structure globale de la commande du système hybride

Et

$$\bar{x}_3 = -\frac{1}{C_{SC}} \int \bar{x}_4 + \bar{V}_{SC0} \quad (4.7)$$

Où  $\bar{V}_{SC0} = \bar{V}_{SC}(t = 0) = 12V$ .

### 4.3.1 Fonction d'énergie

La commande *IDA-PBC* nécessite la connaissance de la fonction d'énergie désirée; la fonction d'énergie naturelle du système est :

$$H = \frac{1}{2} x^T Q x \quad (4.8)$$

Où  $Q = \text{diag}\{L_{FC}; C_{DL}; C_{SC}; L_{SC}; L_L\}$  est une matrice diagonale. La fonction d'énergie désirée en boucle fermée est :

$$H_d = \frac{1}{2} \tilde{x}^T Q \tilde{x} \quad (4.9)$$

Où  $\tilde{x} = x - \bar{x}$  est le nouveau vecteur d'état, il définit l'erreur entre l'état  $x$  et sa valeur à l'équilibre  $\bar{x}$ . Le modèle d'état en fonction de l'erreur devient :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_2 + (\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{C_{DL}} [\mu_1 \tilde{x}_1 + \mu_2 \tilde{x}_4 - \tilde{x}_5 + (\mu_1 - \bar{\mu}_1) \bar{x}_1 + (\mu_2 - \bar{\mu}_2) \bar{x}_4] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{C_{SC}} [-\tilde{x}_4] \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_{SC}} [-\mu_2 \tilde{x}_2 + \tilde{x}_3 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_2 - R_L \tilde{x}_5] \end{cases} \quad (4.10)$$

### 4.3.2 Représentation PCH du système bouclé

La représentation *PCH* du système d'équations (4.10), par le gradient de l'énergie désirée (4.9), est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}] \nabla H_d + A \quad (4.11)$$

Avec

$$\nabla H_d = [L_{FC} \tilde{x}_1; C_{DL} \tilde{x}_2; C_{SC} \tilde{x}_3; L_{SC} \tilde{x}_4; L_L \tilde{x}_5]^T \quad (4.12)$$

Et

$$[\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\mu_1}{C_{DL} L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_1}{C_{DL} L_{FC}} & 0 & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & -\frac{1}{C_{DL} L_L} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & 0 \\ 0 & -\frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & \frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Où  $\mathcal{J}(\mu) = -\mathcal{J}^T(\mu)$  est une matrice antisymétrique qui définit les interconnexions entre les variables d'état.  $\mathcal{R} = \mathcal{R}^T \geq 0$  est une matrice symétrique semi-définie positive représentant l'amortissement naturel du système.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1)\bar{x}_2] \\ \frac{1}{C_{DL}} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1)\bar{x}_1 + (\mu_2 - \bar{\mu}_2)\bar{x}_4] \\ 0 \\ \frac{1}{L_{SC}} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2)\bar{x}_2] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

### 4.3.3 Loi de commande de IDA-PBC

La méthode IDA-PBC consiste à proposer une loi de commande qui stabilise le système au sens de Lyapounov, en modifiant les matrices  $\mathcal{J}$  et  $\mathcal{R}$  afin d'obtenir une dynamique en boucle fermée sous la forme de l'équation suivante :

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}']\nabla H_d \quad (4.15)$$

Il est clair; pour éliminer la matrice  $A$ , il faut choisir  $\mu_1 = \bar{\mu}_1$  et  $\mu_2 = \bar{\mu}_2$ , mais l'amortissement naturel du système ne suffit pas pour atteindre rapidement les valeurs à l'équilibre.

Les lois de commande suivantes sont proposées :

$$\begin{cases} U_{FC} = \bar{U}_{FC} \\ U_{SC} = \bar{U}_{SC} - r\tilde{x}_4 \end{cases} \quad (4.16)$$

Où  $r$  est un paramètre positif qui représente un gain de réglage. En utilisant les lois de commande précédentes (4.6) et (4.16), la fonction de la dérivée de l'erreur devient :

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}']\nabla H_d + A' \quad (4.17)$$

Où

$$[\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}'] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\mu_1}{C_{DL}L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_1}{C_{DL}L_{FC}} & 0 & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DL}L_{SC}} & -\frac{1}{C_{DL}L_L} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{SC}L_{SC}} & 0 \\ 0 & -\frac{\mu_2}{C_{DL}L_{SC}} & \frac{1}{C_{SC}L_{SC}} & -\frac{rV_d}{L_{SC}^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{DL}L_L} & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Et

$$\mathcal{R}' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; \frac{rV_d}{L_{SC}^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = \mathcal{R}'^T \quad (4.19)$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r\bar{x}_4\tilde{x}_4}{C_{DL}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{r\bar{x}_4}{C_{DL}L_{SC}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \nabla H_d \quad (4.20)$$

$$A' = \mathcal{F} \nabla H_d \quad (4.21)$$

$$[\mathcal{R}' - \mathcal{F}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r\bar{x}_4}{C_{DL}L_{SC}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{rV_d}{L_{SC}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

La dérivée de la fonction d'énergie désirée (4.9) au long de la trajectoire de (4.17) est non positive si et seulement si, la matrice suivante est définie non négative  $[\mathcal{R}' - \mathcal{F}] \geq 0$  [BAW10].

**Preuve de stabilité :**

$$\dot{\tilde{x}} = [\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}'] \nabla H_d + \mathcal{F} \nabla H_d = \mathcal{J} \nabla H_d - [\mathcal{R}' - \mathcal{F}] \nabla H_d$$

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{\tilde{x}} = \nabla H_d^T \mathcal{J} \nabla H_d - \nabla H_d^T [\mathcal{R}' - \mathcal{F}] \nabla H_d$$

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T [\mathcal{F} - \mathcal{R}'] \nabla H_d \leq 0$$

La matrice  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est définie semi-négative si et seulement si toutes ses valeurs propres sont négative.

Mathématiquement, les valeurs propres d'une matrice triangulaire sont les éléments de la diagonale. Dans notre cas,  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est une matrice triangulaire supérieure dont ses valeurs propres sont :  $0, 0, 0, -\frac{rV_d}{L_{SC}^2}, -\frac{R_L}{L_L^2}$ . Donc, les valeurs propres de  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  sont des valeurs négatives car,  $r, V_d, L_{SC}, R_L$  et  $L_L$  sont des constantes positives.

$V_{SC}(V)$	$V_{DL}(V)$	$R_L(\Omega)$	$L_L(mH)$	$E_L(V)$	$r$	$C_{SC}(F)$	$C_{DL}(mF)$
12, à $t = 0s$ ,	42	10	10	10	0.01	584	15

Tableau 4.1: Différents paramètres de simulation de la source hybride FC/SC sans filtre [ABH<sup>+</sup>10]

Alors, la dérivée de la fonction d'énergie désirée (4.9) au long de la trajectoire de (4.17) et avec les lois de commande proposées (4.6), (4.16) est définie semi-négative. Conséquemment, le système en boucle fermée (4.17) est globalement stable.

#### 4.3.4 Résultats de simulation

Les différents paramètres de la simulation sont donnés dans le tableau (4.1). L'unité de puissance est obtenue par la mise en série de six supercondensateurs de 3500  $F$ . La tension nominale de chaque élément des supercondensateurs est de 2.5  $V$ . La valeur initiale de la tension des supercondensateurs est de 12  $V$ . Nous imposons une tension de référence où la tension du bus continu  $V_{DL}$  doit la suivre.

La base des règles de la logique floue est donnée par le tableau (4.2). Dans ce tableau, nous avons neuf règles, par exemple :

$$\text{Règle 1 : } \mathbf{Si} \ x_1 \text{ est } \mu_{SoC_{SC}(Bas)} \text{ et } x_2 \text{ est } \mu_{QH_2(Bas)} \ \mathbf{Alors} \ \bar{I}_{SC} \text{ est } 0 \quad (4.23)$$

Si le  $SoC$  du supercondensateurs et la quantité de  $H_2$  sont dans le mode  $Bas$ , alors le courant de référence du supercondensateurs est nul. Dans ce cas, la charge est alimentée uniquement par la pile à combustible.

$$\text{Règle 2 : } \mathbf{Si} \ x_1 \text{ est } \mu_{SoC_{SC}(Moy)} \text{ et } x_2 \text{ est } \mu_{QH_2(Bas)} \ \mathbf{Alors} \ \bar{I}_{SC} \text{ est } GPos^1 \quad (4.24)$$

Dans ce mode, la charge est alimentée par les deux sources simultanément.

$$\text{Règle 7 : } \mathbf{Si} \ x_1 \text{ est } \mu_{SoC_{SC}(Bas)} \text{ et } x_2 \text{ est } \mu_{QH_2(Haut)} \ \mathbf{Alors} \ \bar{I}_{SC} \text{ est } GNeg^2 \quad (4.25)$$

Dans ce mode, la pile à combustible alimente la charge et les supercondensateurs.

Le changement de la résistance de la charge, de la valeur 10  $\Omega$  à la valeur 15  $\Omega$  et puis à 10  $\Omega$  est fait à l'instant 6  $s$  et à 8  $s$ , comme le montre la figure (4.3).

<sup>1</sup>GPos : Grand Positif

<sup>2</sup>GNeg : Grand Négatif

$QH_2 \backslash SoC_{SC}$	<i>Bas</i>	<i>Moy</i>	<i>Haut</i>
<i>Bas</i>	0	<i>GPos</i>	<i>GPos</i>
<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
<i>Haut</i>	<i>GNeg</i>	0	0

Tableau 4.2: La base des règles de la logique floue

La figure (4.4) présente la réponse du système due au changement de la tension de référence du bus continu  $V_d$ , et le courant de la charge  $I_L$ . La tension du bus continu suit parfaitement sa référence, un faible dépassement et il n'y a pas d'erreur statique remarquée.

Les figures (4.5) et (4.6) illustrent la tension, le courant de la pile à combustible et la tension, le courant du supercondensateurs respectivement. Quand la quantité d'hydrogène  $QH_2$  diminue, les supercondensateurs alimentent la charge avec la pile à combustible en régimes transitoire et permanent, s'ils sont chargés. Par contre dans la référence [ABH<sup>+</sup>10], les supercondensateurs alimentent la charge uniquement pendant les régimes transitoires. Le courant de supercondensateurs  $I_{SC}$  suit parfaitement sa référence  $\bar{I}_{SC}$ .

La figure (4.7) présente les signaux de commande des convertisseurs Boost et Buck-boost.  $U_{FC}$  et  $U_{SC}$  sont dans l'intervalle  $[0, 1]$ .

La figure (4.8) présente les variations de la  $QH_2$  et  $SoC$  les puissance du FC et SC fournies à la charge.

La figure (4.9) montre le transfert des puissance entre les sources et la charge. Nous pouvons remarquer que la somme des puissance des sources égale à la puissance de la charge.

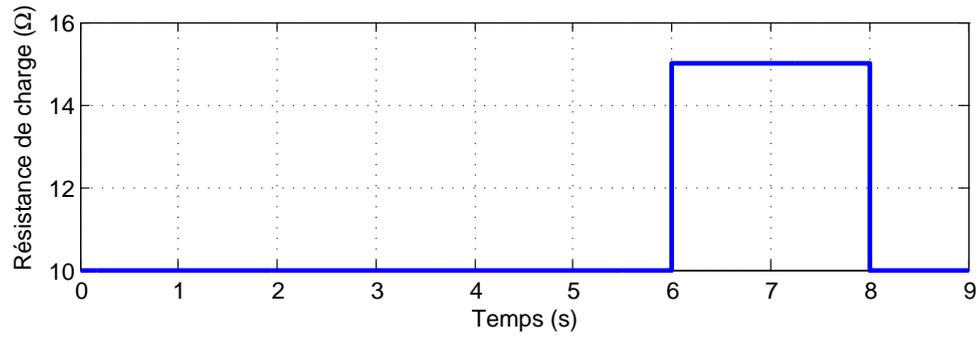


Figure 4.3: Changement de la résistance de la charge.

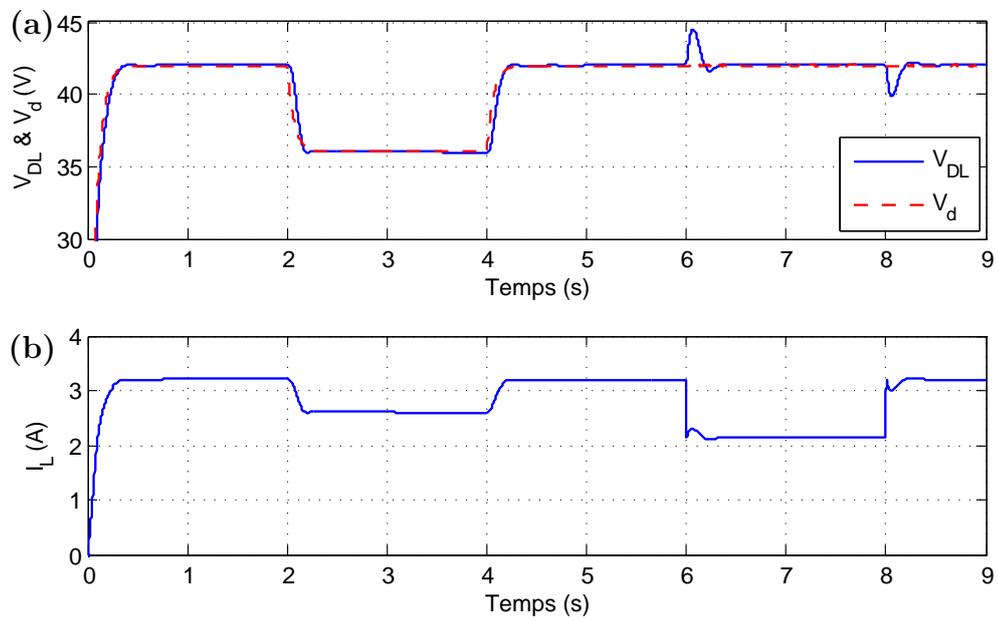


Figure 4.4: (a) Tension du bus continu et sa référence  
(b) Courant de la charge

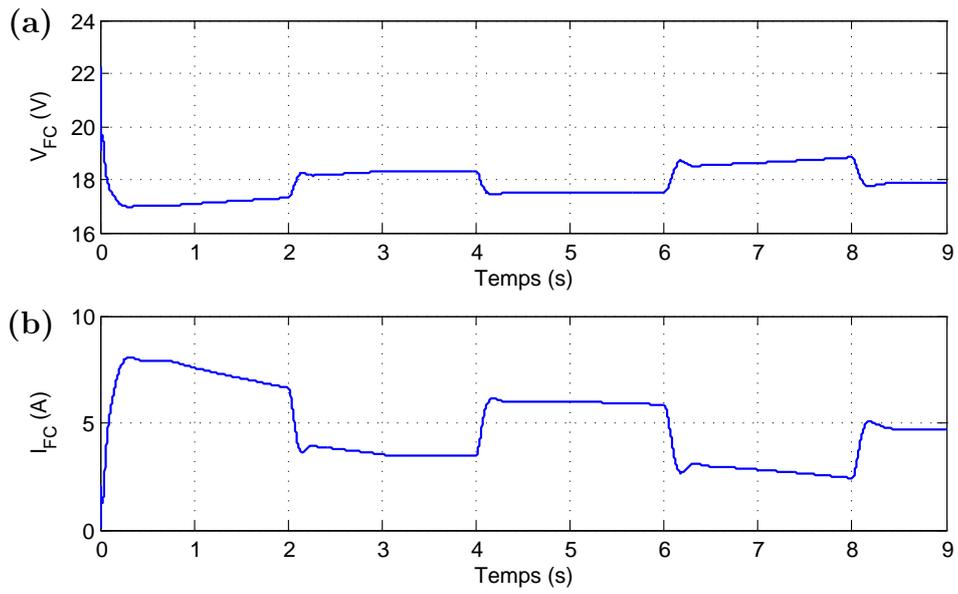


Figure 4.5: (a) Tension du  $FC$ . (b) Courant du  $FC$ .

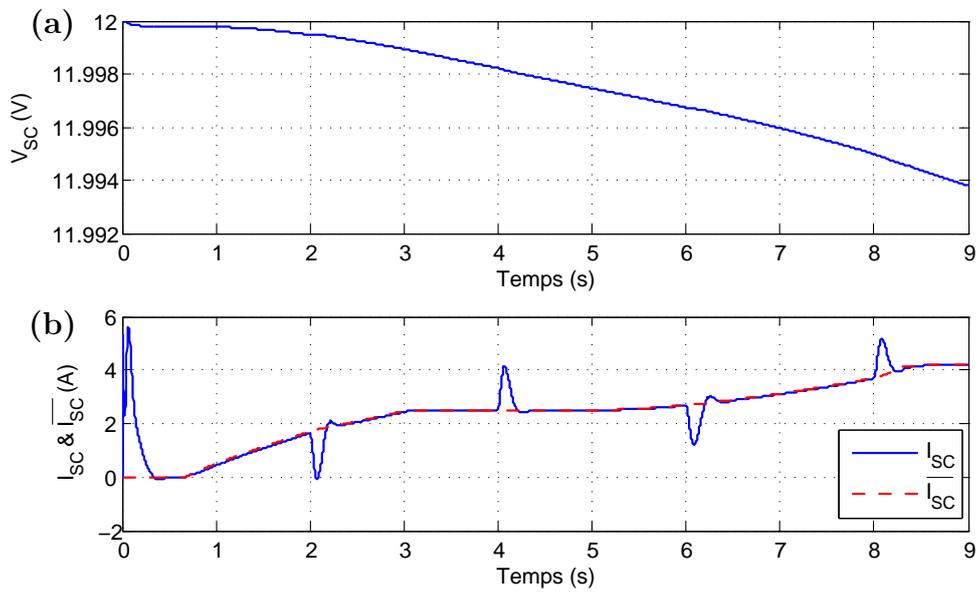


Figure 4.6: (a) Tension du  $SC$ . (b) Courant du  $SC$  et sa référence

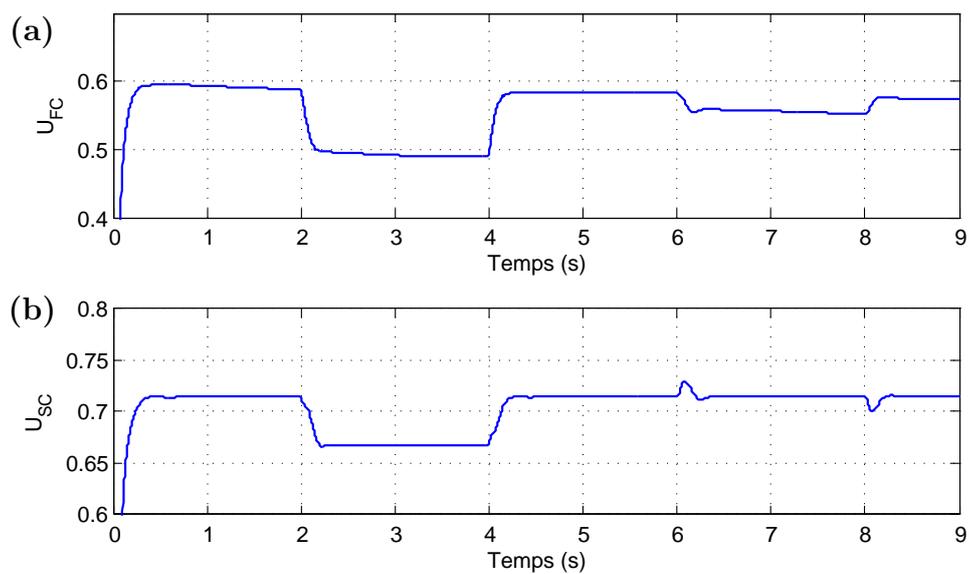


Figure 4.7: (a) Commande du convertisseur Boost du *FC*  
 (b) Commande du convertisseur Buck-Boost du *SC*

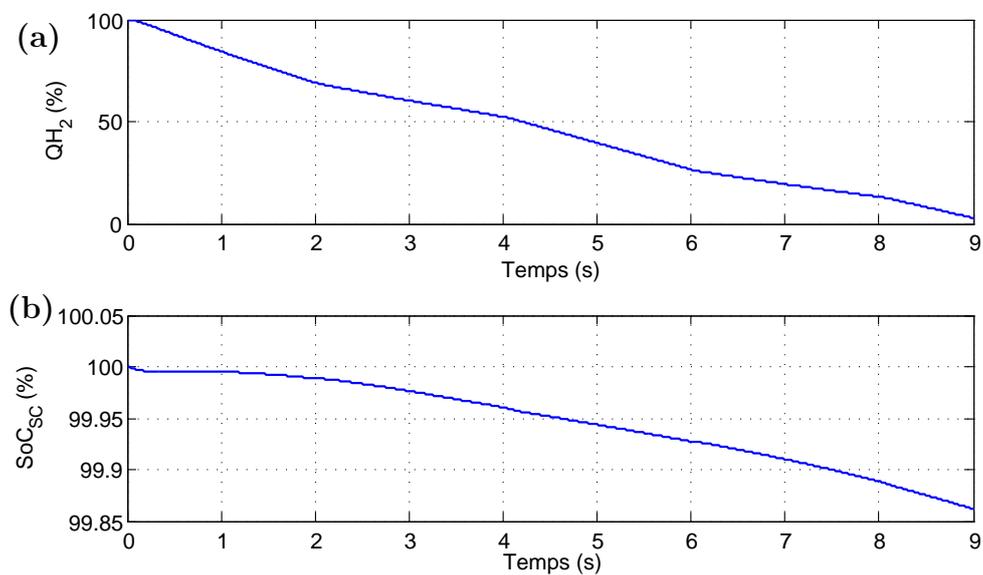


Figure 4.8: (a)  $QH_2$  du *FC*. (b)  $SoC$  du Supercondensateur

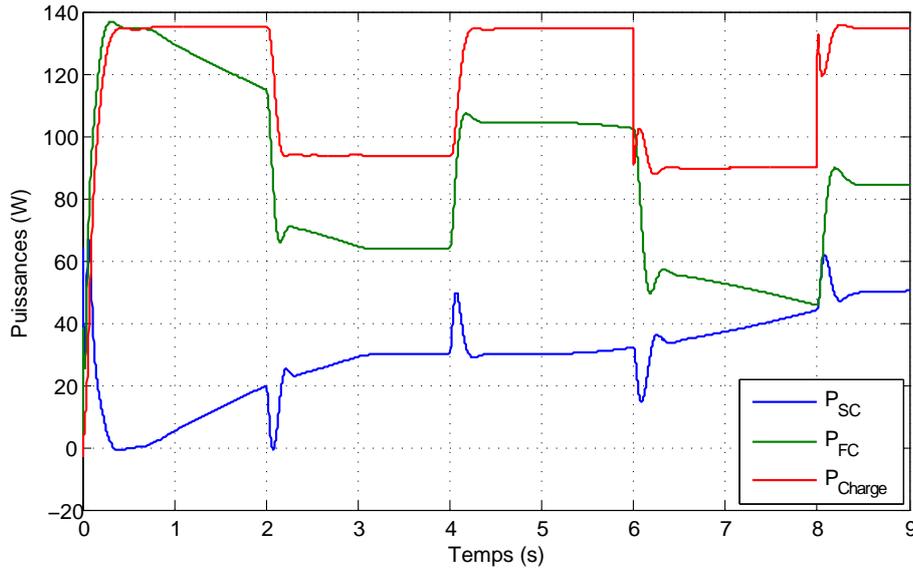


Figure 4.9: Transfert de puissances

## 4.4 Gestion de l'énergie de la source hybride FC/SC avec filtre

Dans cette section, nous avons pris en considération le filtre  $L, C$ , alors, le modèle de la source hybride devient à sept variables d'état [MKB+14]. Le vecteur d'espace d'état à l'équilibre est :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6, \bar{x}_7]^T \quad (4.26)$$

À l'équilibre, le système de l'équation (2.33) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\bar{\mu}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_4] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\bar{\mu}_1 \bar{x}_1 + V_{FC}] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\bar{x}_4 + \bar{\mu}_2 \bar{x}_6 - \bar{x}_7] \\ \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\bar{x}_1 - \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_5 = \frac{1}{C_{SC}} [-\bar{x}_6] \\ \dot{\bar{x}}_6 = \frac{1}{L_{SC}} [-\bar{\mu}_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_5] \\ \dot{\bar{x}}_7 = \frac{1}{L_L} [\bar{x}_3 - R_L \bar{x}_7 - E_L] \end{array} \right. \quad (4.27)$$

Nous pouvons exprimer le vecteur des états à l'équilibre  $\bar{x}$  et le vecteur de commande  $\bar{\mu}$  par :

$$\begin{cases} \bar{x} = [V_d, \bar{I}_{FC}, V_d, \bar{I}_{DL}, \bar{V}_{SC}, \bar{I}_{SC}, \frac{V_d - E_L}{R_L}]^T \\ \bar{\mu}_1 = \frac{1}{V_d}(V_{FC} - L_{FC}\dot{\bar{x}}_2) \\ \bar{\mu}_2 = \frac{1}{V_d}(\bar{x}_5 - L_{SC}\dot{\bar{x}}_6) \end{cases} \quad (4.28)$$

Où  $\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2]^T = [(1 - \bar{U}_{FC}), (1 - \bar{U}_{SC})]^T$ . Le modèle d'état en fonction de l'erreur devient :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{C_S}[\mu_1\tilde{x}_2 - \tilde{x}_4 + (\mu_1 - \bar{\mu}_1)\bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}}[-\mu_1\tilde{x}_1 + (\bar{\mu}_1 - \mu_1)\bar{x}_1] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}}[\tilde{x}_4 + \mu_2\tilde{x}_6 - \tilde{x}_7 + (\mu_2 - \bar{\mu}_2)\bar{x}_6] \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}}[\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{C_{SC}}[-\tilde{x}_6] \\ \dot{\tilde{x}}_6 = \frac{1}{L_{SC}}[-\mu_2\tilde{x}_3 + \tilde{x}_5 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2)\bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_7 = \frac{1}{L_L}[\tilde{x}_3 - R_L\tilde{x}_7] \end{cases} \quad (4.29)$$

#### 4.4.1 Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC

La représentation *PCH* du système d'équations (4.29), par le gradient de l'énergie désirée (4.9), est donnée par l'équation (4.11).

Où

$$\nabla H_d = [C_S\tilde{x}_1; L_{FC}\tilde{x}_2; C_{DL}\tilde{x}_3; L_{DL}\tilde{x}_4; C_{SC}\tilde{x}_5; L_{SC}\tilde{x}_6; L_L\tilde{x}_7]^T \quad (4.30)$$

et

$$[\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & -\frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & -\frac{1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & -\frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & 0 & \frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_S} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1)\bar{x}_2] \\ \frac{1}{C_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1)\bar{x}_1] \\ \frac{1}{C_{DL}} [(\mu_2 - \bar{\mu}_2)\bar{x}_6] \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_{SC}} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2)\bar{x}_3] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Les lois de commande suivantes sont proposées [ABH<sup>+</sup>10], pour introduire un paramètre positif  $r$  de réglage dans la matrice d'amortissement du système.

$$\begin{cases} U_{FC} = \bar{U}_{FC} \\ U_{SC} = \bar{U}_{SC} - r\tilde{x}_6 \end{cases} \quad (4.33)$$

En utilisant les lois de commande précédentes (4.28), (4.33). La dérivée de l'erreur devient sous la forme de l'équation (4.17).

avec

$$\mathcal{R}' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; 0; 0; \frac{rV_d}{L_{SC}^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = \mathcal{R}'^T \quad (4.34)$$

et

$$A' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r\bar{x}_6\tilde{x}_6}{C_{DL}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r\bar{x}_6}{C_{DL}L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \nabla H_d = \mathcal{F} \nabla H_d \quad (4.35)$$

$$[\mathcal{R}' - \mathcal{F}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r\bar{x}_6}{C_{DL}L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{rV_d}{L_{SC}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_L}{L_L^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

La même preuve de stabilité que dans le cas précédent. Donc, le système est globalement stable en boucle fermée.

## 4.4.2 Résultats de Simulation

Les différents paramètres de la simulation de cette source hybride sont donnés dans le tableau (4.3). Nous utilisons la même base des règles donnée par le tableau (4.4).

$V_{SC}(V)$	$V_{DL}(V)$	$R_L(\Omega)$	$L_L(mH)$	$E_L(V)$	$r$	$C_{SC}(F)$	$C_{DL}(mF)$	$C_S(mF)$
12, à $t = 0s$ ,	60	10	10	10	0.01	584	15	300

Tableau 4.3: Différents paramètres de simulation de la source hybride FC/SC avec filtre [ABH<sup>+</sup>10]

La figure (4.10) présente le comportement de  $V_{DL}$ , sa référence  $V_d$  et le courant de la charge  $I_L$  dû aux mêmes variations de la charge de la figure (4.3). Il est clair de voir que  $V_{DL}$  suit bien sa référence  $V_d$  sans erreur statique et avec un léger dépassement acceptable, égale à 3,64%.

Les figures (4.11) et (4.12) montrent les réponses de la pile à combustible,  $V_{FC}$ ,  $I_{FC}$  et du supercondensateurs,  $V_{SC}$ ,  $I_{SC}$  respectivement. Lorsque la quantité d'hydrogène est en baisse, l'alimentation de la charge se fait par les deux sources en régimes transitoire et permanent. Le  $I_{SC}$  suit ainsi son signal de référence  $\bar{I}_{SC}$  qui est considéré comme l'état de l'équilibre de  $I_{SC}$  en PBC.

$QH_2 \backslash SoC_{SC}$	<i>Bas</i>	<i>Moy</i>	<i>Haut</i>
<i>Bas</i>	0	<i>GPos</i>	<i>GPos</i>
<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>
<i>Haut</i>	<i>GNeg</i>	<i>GNeg</i>	0

Tableau 4.4: La base des règles de la logique floue

La figure (4.13) présente les signaux commande  $U_{FC}$  du convertisseur Boost du  $FC$  et  $U_{SC}$  du convertisseur Buck-Boost du  $SC$ .

La figure (4.14) montre les variations de  $QH_2$  et  $SoC_{SC}$  selon les puissances de  $FC$  et  $SC$  fournis à la charge. La puissance de la charge est obtenue à partir du système hybride par la somme des puissances du  $SC$  et  $FC$ .

La figure (4.15) montre le transfert des puissance entre les sources et la charge. Nous pouvons remarquer que la somme des puissance des sources égale à la puissance de la charge.

Afin de tester la robustesse de la commande proposée, une perturbation est imposée dans la simulation. Ce test est effectué par le changement de la charge  $R_L$  à l'instant 0.1s en régime transitoire du système (Figure (4.16)). A cause de la perturbation, un très petit dépassements de  $V_{DL}$  est observé mais la commande montre une bonne robustesse vis-à-vis les perturbations de la charge et  $V_{DL}$  suit rapidement encore sa référence  $V_d$  après la perturbation sans erreur statique.

Enfin, ces résultats de simulation démontrent la robustesse et la performance dynamique des contrôleurs proposés appliqués à la source hybride  $FC/SC$  et montrent une stratégie efficace de gestion de l'énergie basée sur la  $PBC$  en utilisant un contrôleur flou qui permet au  $SC$  d'alimenter la charge avec le  $FC$  à l'état d'équilibre pour réduire la consommation d'hydrogène de  $FC$ .

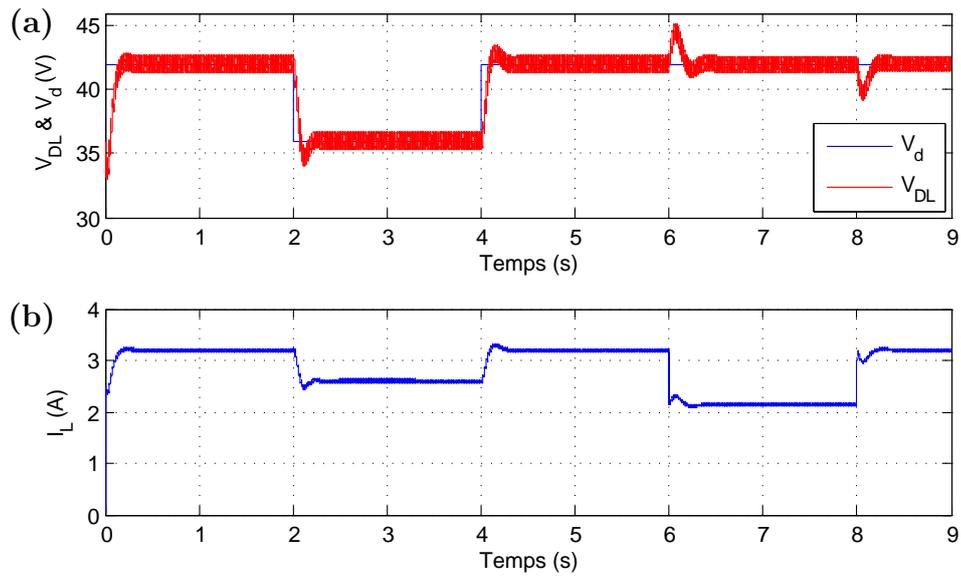


Figure 4.10: (a) Tension du bus continu et sa référence  
(b) Courant de la charge

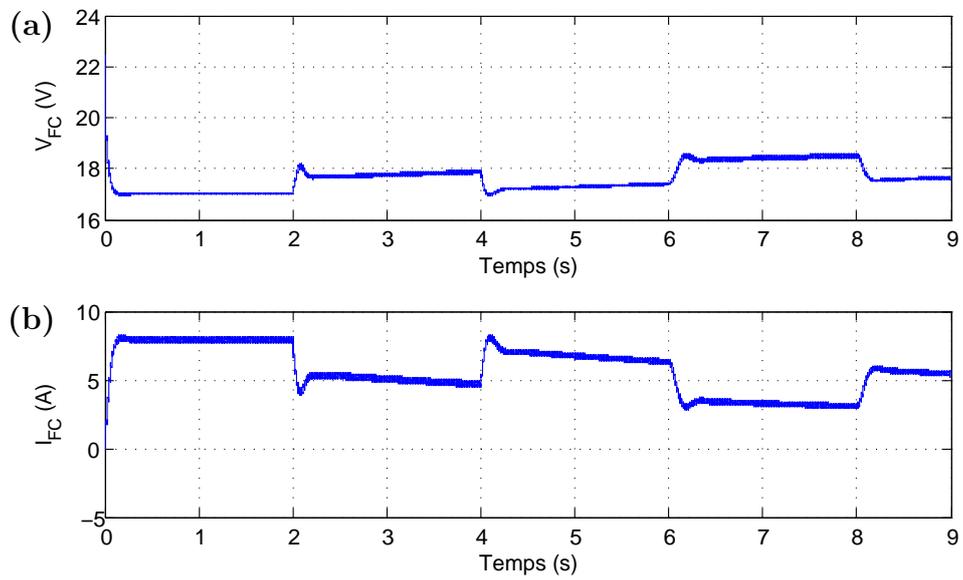


Figure 4.11: (a) Tension du FC. (b) Courant du FC

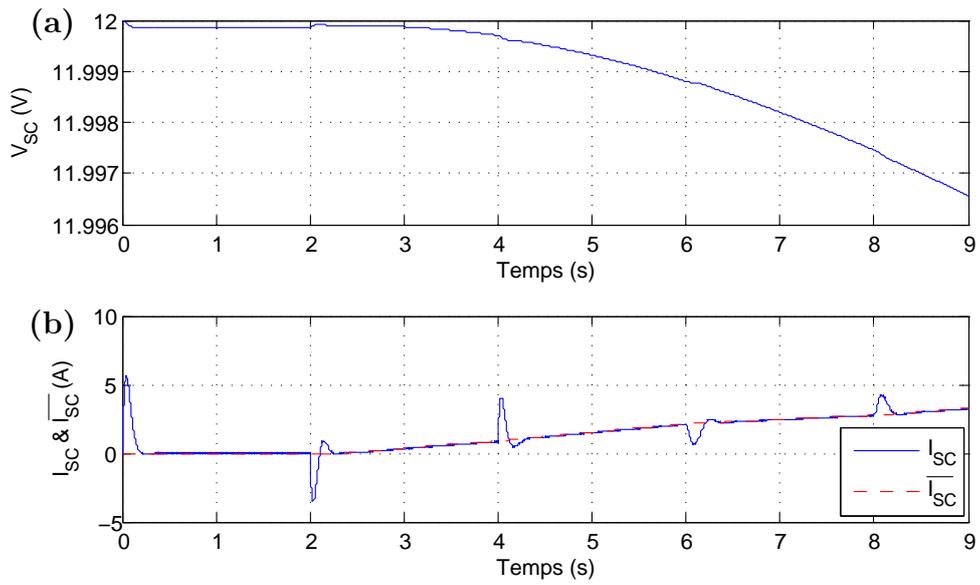


Figure 4.12: (a) Tension du  $SC$ . (b) Courant du  $SC$  et sa référence.

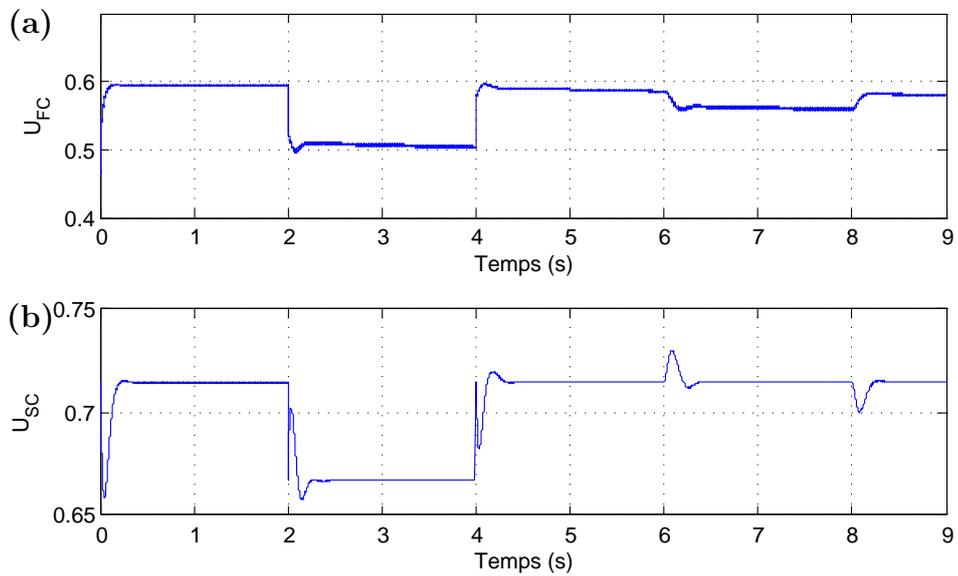


Figure 4.13: (a) Commande du convertisseur Boost du  $FC$   
(b) Commande du convertisseur Buck-Boost du  $SC$

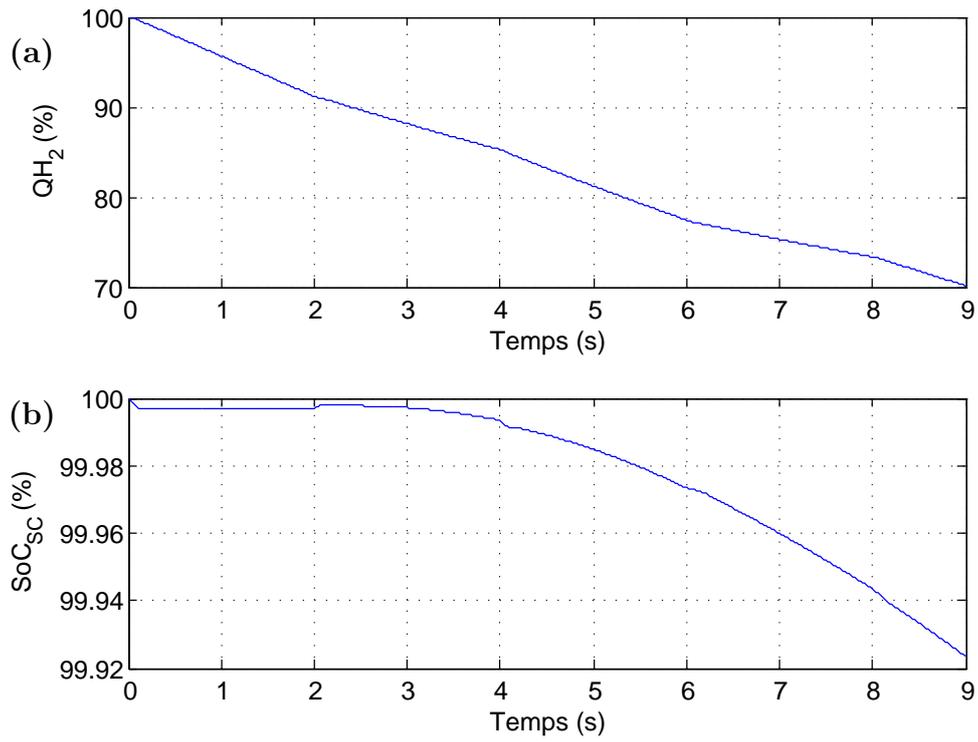


Figure 4.14: (a)  $QH_2$  du FC. (b)  $SoC$  du Supercondensateur

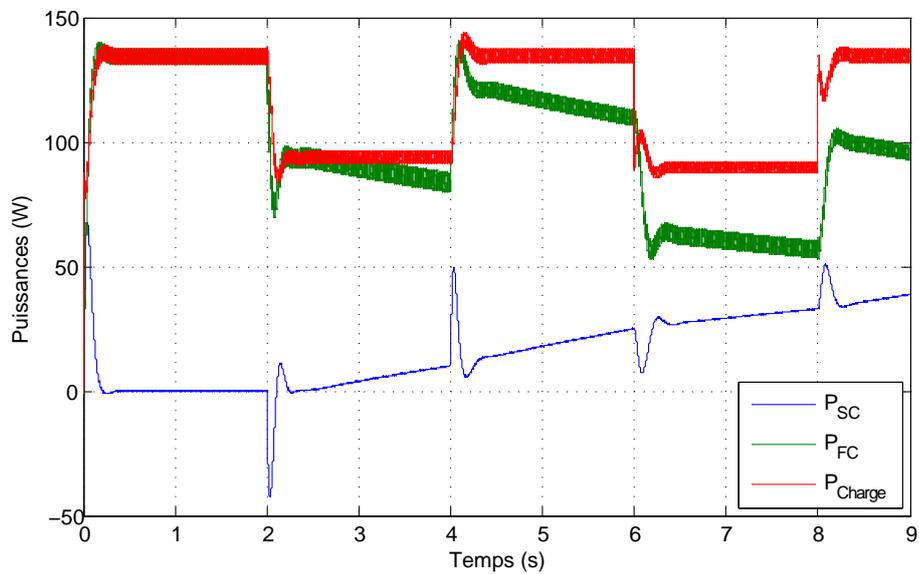


Figure 4.15: Transfert de puissances

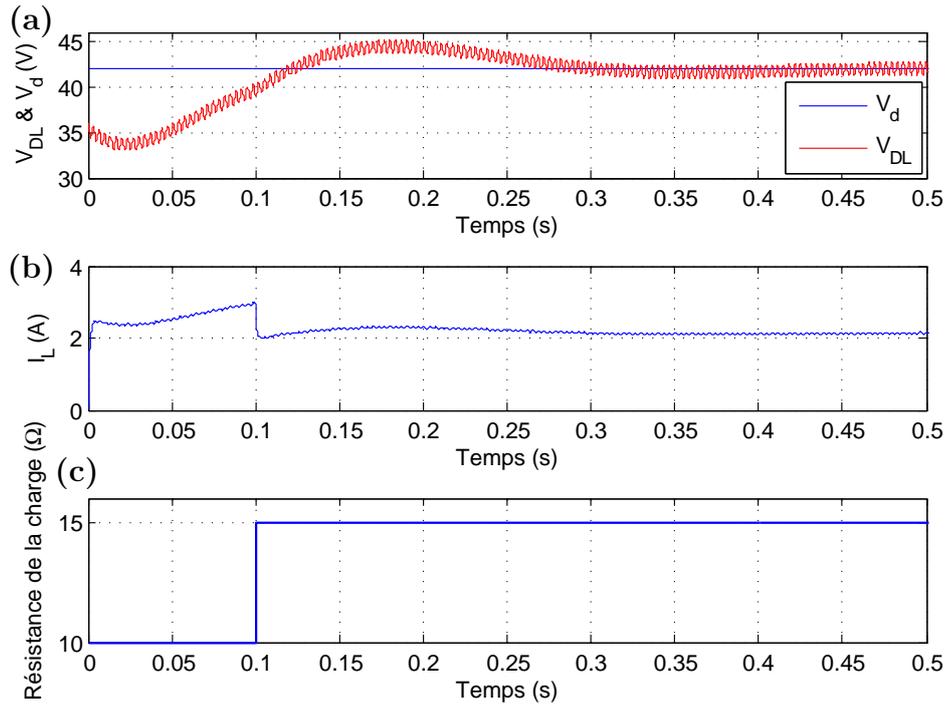


Figure 4.16: (a) Tension du bus continu et sa référence

(b) Courant de la charge

(c) Changement de la charge

## 4.5 Gestion de l'énergie de la source hybride FC/- Batterie

Dans cette source hybride, nous avons remplacé les supercondensateurs par une batterie et nous voulons voir le comportement du système due à ce changement [MBA+15].

Le vecteur d'espace d'état à l'équilibre est :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6]^T \quad (4.37)$$

A l'équilibre, le système de l'équation (2.37) devient :

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\bar{\mu}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_4] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\bar{\mu}_1 \bar{x}_1 + V_{FC}] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\bar{x}_4 + \bar{\mu}_2 \bar{x}_5 - \bar{x}_6] \\ \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\bar{x}_1 - \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_5 = \frac{1}{L_B} [-\bar{\mu}_2 \bar{x}_3 - r_B \bar{x}_5 + e_B] \\ \dot{\bar{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\bar{x}_3 - R_L \bar{x}_6 - E_L] \end{cases} \quad (4.38)$$

Nous pouvons exprimer le vecteur des états à l'équilibre  $\bar{x}$  et le vecteur de commande  $\bar{\mu}$  par :

$$\begin{cases} \bar{x} = [V_d, \bar{I}_{FC}, V_d, \bar{I}_{DL}, \bar{I}_B, \frac{V_d - E_L}{R_L}]^T \\ \bar{\mu}_1 = \frac{1}{V_d} (V_{FC} - L_{FC} \dot{\bar{x}}_2) \\ \bar{\mu}_2 = \frac{1}{V_d} (e_B - r_B \bar{x}_5 - L_B \dot{\bar{x}}_5) \end{cases} \quad (4.39)$$

Où  $\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2]^T = [(1 - \bar{U}_{FC}), (1 - \bar{U}_B)]^T$ .

et

$$\bar{V}_B = e_B - r_B \bar{x}_5 \quad (4.40)$$

Où  $V_B$  est la tension de la batterie,  $e_B$  est la force électromotrice de la batterie, et  $r_B$  est la résistance interne de la batterie.

Le modèle d'état en fonction de l'erreur devient :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\mu_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_4 + (\mu_1 - \bar{\mu}_1) \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_1 + (\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_1] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\tilde{x}_4 + \mu_2 \tilde{x}_5 - \tilde{x}_6 + (\mu_2 - \bar{\mu}_2) \bar{x}_5] \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{L_B} [-\mu_2 \tilde{x}_3 - r_B \tilde{x}_5 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_6 = \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_3 - R_L \tilde{x}_6] \end{cases} \quad (4.41)$$

### 4.5.1 Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC

La représentation *PCH* du système d'équations (4.41), par le gradient de l'énergie désirée (4.9), est donnée par l'équation (4.11).

avec

$$\nabla H_d = [C_S \tilde{x}_1; L_{FC} \tilde{x}_2; C_{DL} \tilde{x}_3; L_{DL} \tilde{x}_4; L_B \tilde{x}_5; L_L \tilde{x}_6]^T \quad (4.42)$$

et

$$[\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & -\frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & -\frac{1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & -\frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & 0 & -\frac{r_B}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_S} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \bar{x}_2] \\ \frac{1}{L_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_1] \\ \frac{1}{C_{DL}} [(\mu_2 - \bar{\mu}_2) \bar{x}_5] \\ 0 \\ \frac{1}{L_B} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_3] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Les lois de commande suivantes sont proposées :

$$\begin{cases} U_{FC} = \bar{U}_{FC} \\ U_B = \bar{U}_B - r \tilde{x}_5 \end{cases} \quad (4.45)$$

En utilisant les lois de commande précédentes (4.39), (4.45) la fonction de la dérivée de l'erreur devient sous la forme de l'équation (4.17).

Où

$$[\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}'] =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & -\frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & -\frac{1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & -\frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_2}{C_{DL} L_B} & 0 & -\frac{r_B + rV_d}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

$$\mathcal{R}' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; 0; \frac{r_B + rV_d}{L_B^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = \mathcal{R}'^T \quad (4.47)$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r\bar{x}_5\tilde{x}_5}{C_{DL}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r\bar{x}_5}{C_{DL} L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \nabla H_d = \mathcal{F} \nabla H_d \quad (4.48)$$

$$[\mathcal{R}' - \mathcal{F}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r\bar{x}_5}{C_{DL} L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r_B + rV_d}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

De la même façon que nous avons prouvé la stabilité dans le cas précédent. Donc, La matrice  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est définie semi-négative si et seulement si toutes ses valeurs propres sont négative. La matrice  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est une matrice triangulaire supérieure dont ses valeurs propres sont négatives :  $0; 0; 0; 0; -\frac{r_B + rV_d}{L_B^2}; -\frac{R_L}{L_L^2}$ , tandis que les constantes  $r, V_d, r_B, L_B, R_L$  et  $L_L$  sont positives. Alors, le système est globalement stable en boucle fermée.

## 4.5.2 Résultats de Simulation

Les différents paramètres de la simulation de cette source hybride sont donnés dans le tableau (4.4). Nous avons utilisé la même base des règles donnée par le tableau (4.6), mais avec des fonctions d'appartenance différentes.

Nous avons utilisé dans cette simulation les mêmes variation de la charge illustrées dans la figure (4.9).

La figure (4.17) présente le comportement de  $V_{DL}$ , sa référence  $V_d$  et le courant de la charge  $I_L$ . Il est claire de voir que  $V_{DL}$  suit bien sa référence  $V_d$  sans erreur statique et avec un léger dépassement acceptable, environ de 4.52%.

Les figures (4.18) et (4.19) montrent les réponses de la pile à combustible,  $V_{FC}$ ,  $I_{FC}$  et de la batterie,  $V_B$ ,  $I_B$  respectivement. Lorsque la quantité d'hydrogène est en baisse, l'alimentation de la charge se fait par les deux sources en régimes transitoire et permanent. Le  $I_B$  suit ainsi son signal de référence  $\bar{I}_B$  qui est considéré comme l'état de l'équilibre de  $I_B$  en PBC.

Les signaux commande  $U_{FC}$  du convertisseur Boost du  $FC$  et  $U_B$  du convertisseur Buck-Boost de la batterie sont présentés par la figure (4.20).

Les figures (4.21), (4.22) montrent les variations de  $QH_2$  et  $SoC_B$  selon les puissances de  $FC$  et la batterie fournis à la charge. La puissance de la charge est obtenue à partir du système hybride par la somme des puissances du  $SC$  et de la batterie.

$e_B(V)$	$V_{DL}(V)$	$R_L(\Omega)$	$L_L(mH)$	$E_L(V)$	$r$	$C_{SC}(F)$
12	42	10	10	10	0.01	584

Tableau 4.5: Différents paramètres de simulation de la source hybride FC/Batterie [ABP<sup>+</sup>07], [ABH<sup>+</sup>10]

$QH_2 \backslash SoC_B$	<i>Bas</i>	<i>Moy</i>	<i>Haut</i>
<i>Bas</i>	0	<i>GPos</i>	<i>Pos</i>
<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
<i>Haut</i>	<i>GNeg</i>	0	<i>Pos</i>

Tableau 4.6: La base des règles de la logique floue

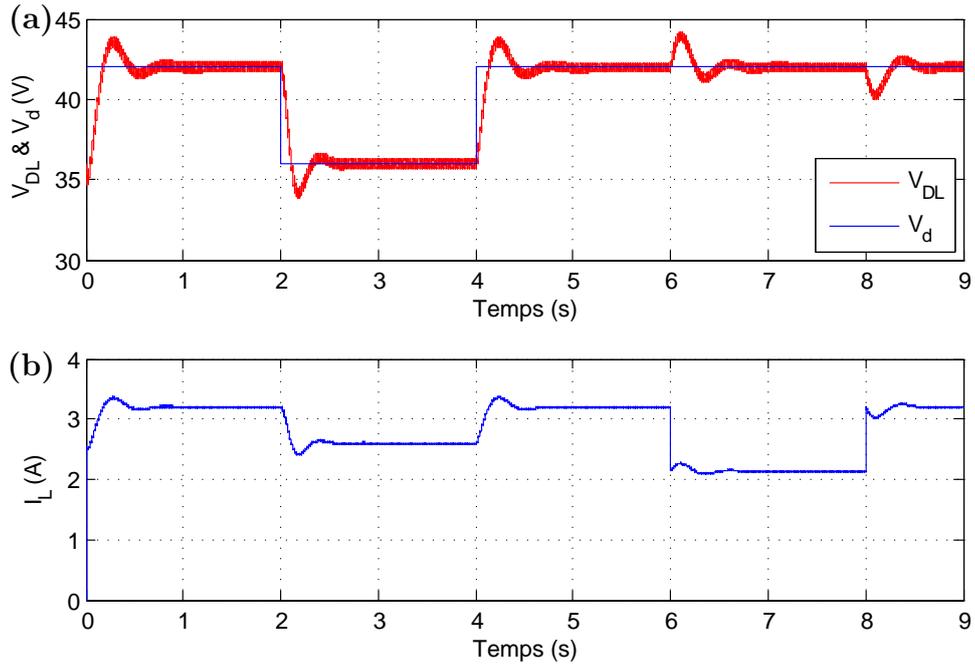


Figure 4.17: (a) Tension du bus continu et sa référence  
(b) Courant de la charge

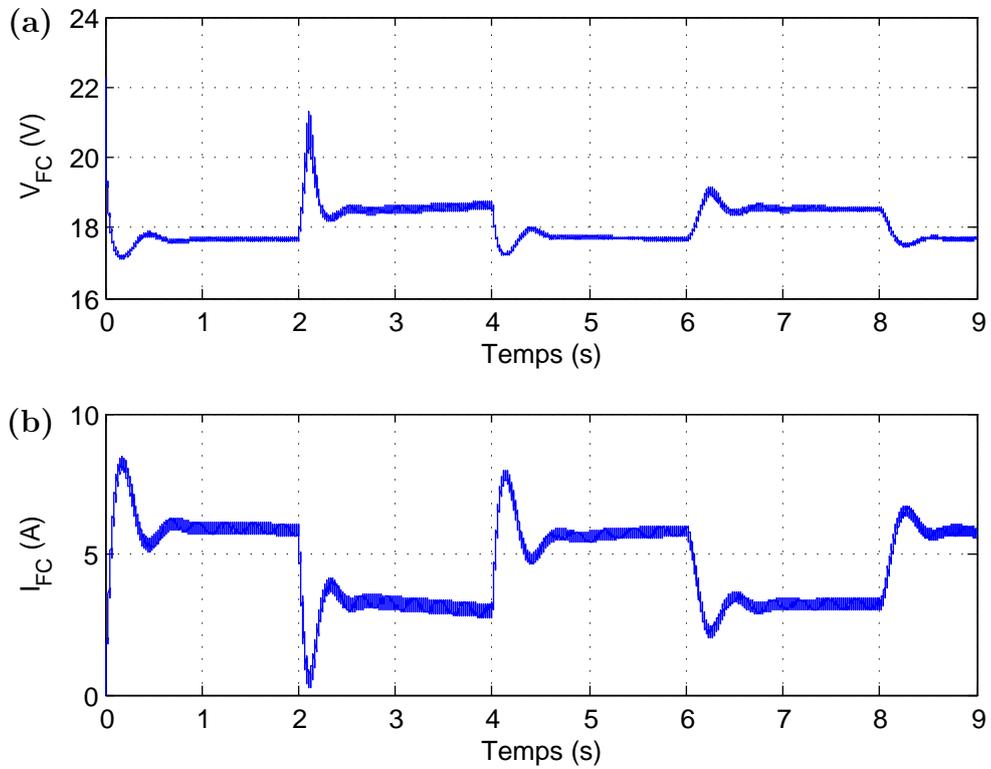


Figure 4.18: (a) Tension du FC. (b) Courant du FC

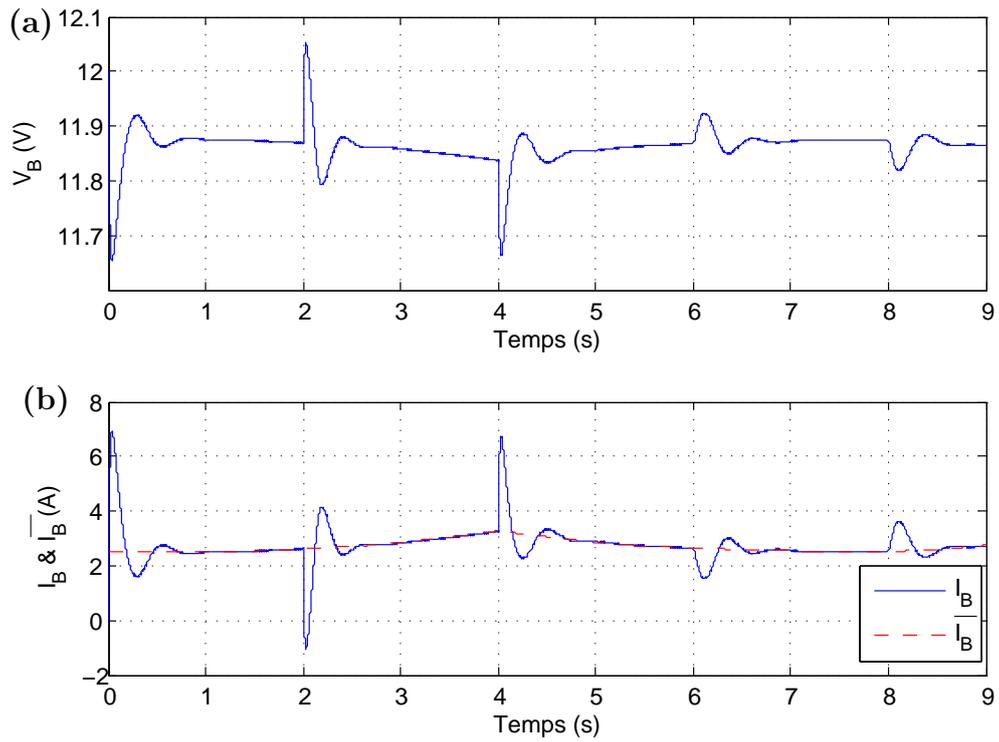


Figure 4.19: (a) Tension de la batterie  
(b) Courant de la batterie et sa référence

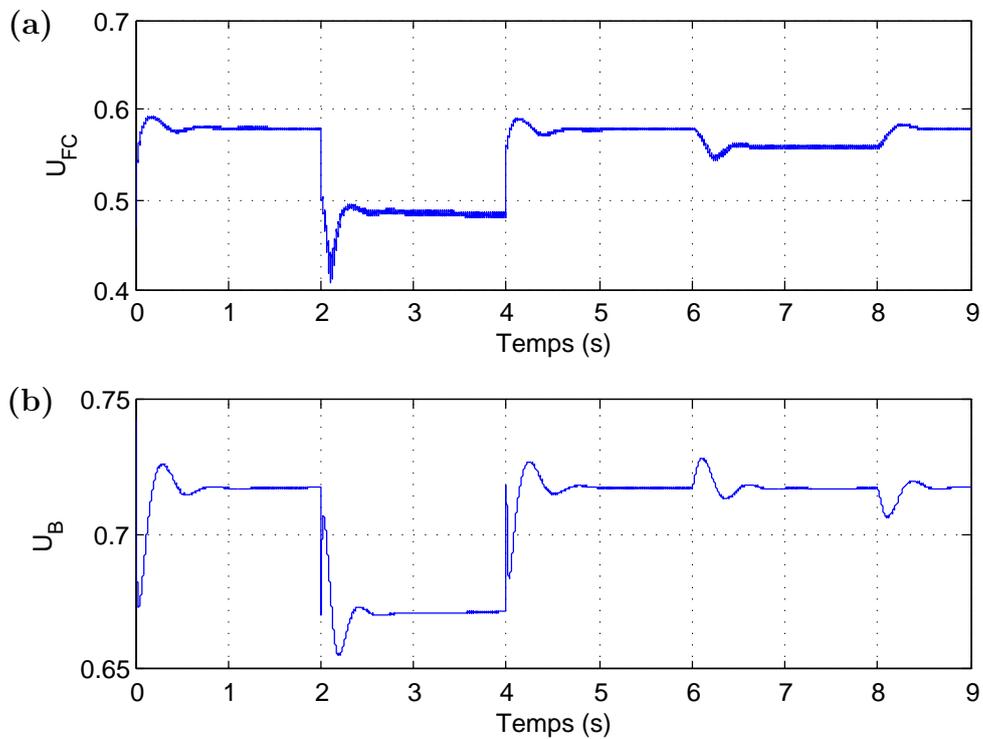


Figure 4.20: (a) Commande du convertisseur Boost du FC  
(b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie

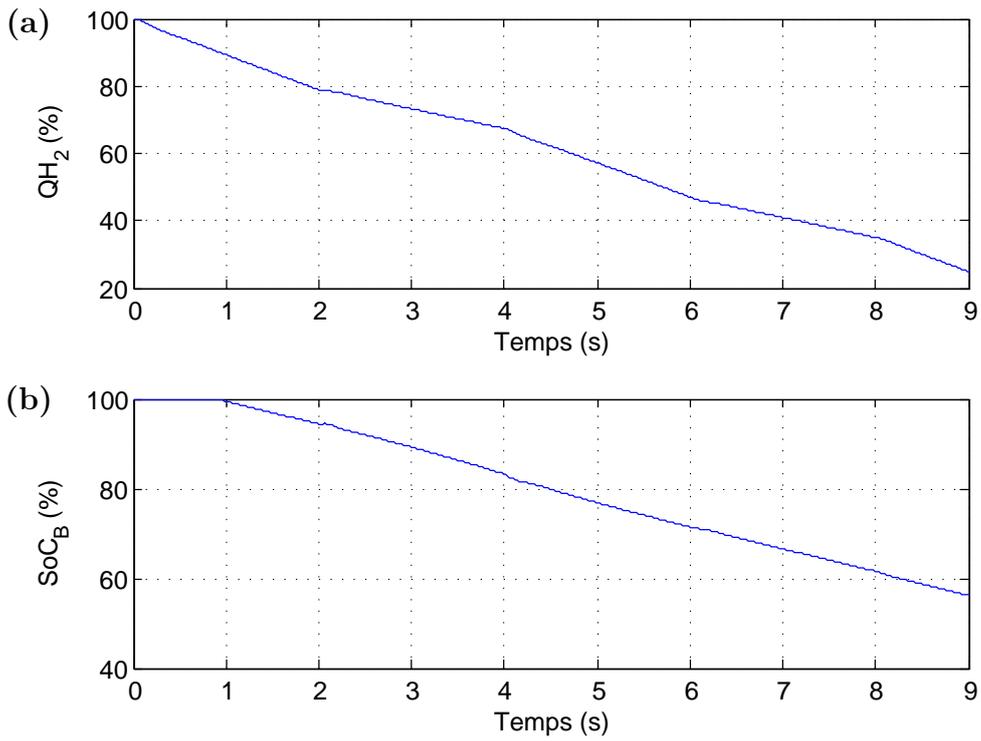


Figure 4.21: (a)  $QH_2$  du FC. (b)  $SoC$  de la batterie

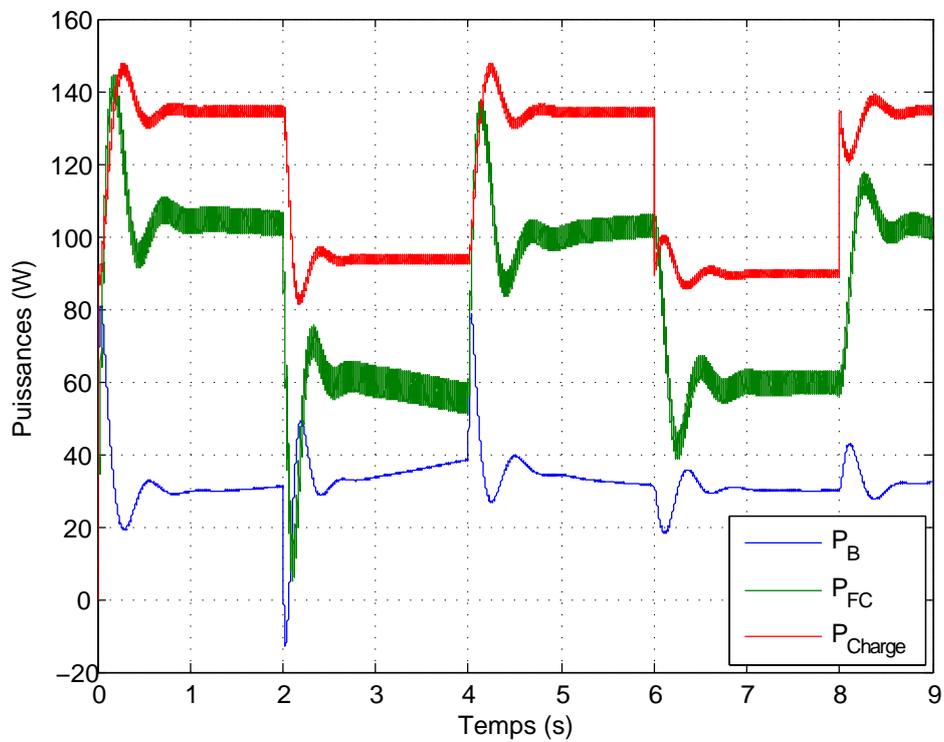


Figure 4.22: Transfert de puissances

## 4.6 Gestion de l'énergie de la source hybride FC/- Batterie/SC

Après avoir obtenu le système d'équations (2.43) de la figure (2.18), le vecteur d'espace d'état à l'équilibre est :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6, \bar{x}_7, \bar{x}_8]^T \quad (4.50)$$

A l'équilibre, le système de l'équation (2.43) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{C_S} [\bar{\mu}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_4] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [-\bar{\mu}_1 \bar{x}_1 + V_{FC}] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}} [\bar{x}_4 + \bar{\mu}_2 \bar{x}_6 + \bar{\mu}_3 \bar{x}_7 - \bar{x}_8] \\ \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}} [\bar{x}_1 - \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_5 = \frac{1}{C_{SC}} [-\bar{x}_6] \\ \dot{\bar{x}}_6 = \frac{1}{L_{SC}} [-\bar{\mu}_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_5] \\ \dot{\bar{x}}_7 = \frac{1}{L_B} [-\bar{\mu}_3 \bar{x}_3 - r_B \bar{x}_7 + e_B] \\ \dot{\bar{x}}_8 = \frac{1}{L_L} [\bar{x}_3 - R_L \bar{x}_8 - E_L] \end{array} \right. \quad (4.51)$$

Nous pouvons exprimer le vecteur des états à l'équilibre  $\bar{x}$  et le vecteur de commande  $\bar{\mu}$  par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} = [V_d, \bar{I}_{FC}, V_d, \bar{I}_{DL}, \bar{V}_{SC}, \bar{I}_{SC}, \bar{I}_B, \frac{V_d - E_L}{R_L}]^T \\ \bar{\mu}_1 = \frac{1}{V_d} (V_{FC} - L_{FC} \dot{\bar{x}}_2) \\ \bar{\mu}_2 = \frac{1}{V_d} (\bar{x}_5 - L_{SC} \dot{\bar{x}}_6) \\ \bar{\mu}_3 = \frac{1}{V_d} (\bar{V}_B - L_B \dot{\bar{x}}_7) \end{array} \right. \quad (4.52)$$

Où  $\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \bar{\mu}_3]^T = [(1 - \bar{U}_{FC}), (1 - \bar{U}_{SC}), (1 - \bar{U}_B)]^T$ .

et  $\bar{x}_5 = -\frac{1}{C_{SC}} \int \bar{x}_6 + \bar{V}_{SC0}$ ,  $\bar{V}_B = e_B - r_B \bar{x}_7$ .

Dans ce système, la pile à combustible et la batterie alimentent la charge et récupérer l'énergie pour charger l'élément de stockage (Batterie). Ainsi, le courant de batterie désiré

$\bar{I}_B$  est déterminé par le contrôleur flou en fonction de l'état de charge de la batterie  $SoC_B$  et la quantité d'hydrogène  $QH_2$ .

Le modèle d'état en fonction de l'erreur devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{C_S}[\mu_1\tilde{x}_2 - \tilde{x}_4 + (\mu_1 - \bar{\mu}_1)\bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{L_{FC}}[-\mu_1\tilde{x}_1 + (\bar{\mu}_1 - \mu_1)\bar{x}_1] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{C_{DL}}[\tilde{x}_4 + \mu_2\tilde{x}_6 + \mu_3\tilde{x}_7 - \tilde{x}_8 + (\mu_2 - \bar{\mu}_2)\bar{x}_6 + (\mu_3 - \bar{\mu}_3)\bar{x}_7] \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_{DL}}[\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 = \frac{1}{C_{SC}}[-\tilde{x}_6] \\ \dot{\tilde{x}}_6 = \frac{1}{L_{SC}}[-\mu_2\tilde{x}_3 + \tilde{x}_5 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2)\bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_7 = \frac{1}{L_B}[-\mu_3\tilde{x}_3 - r_B\tilde{x}_7 + (\bar{\mu}_3 - \mu_3)\bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_8 = \frac{1}{L_L}[\tilde{x}_3 - R_L\tilde{x}_8] \end{array} \right. \quad (4.53)$$

#### 4.6.1 Représentation PCH et loi de commande de IDA-PBC

La représentation *PCH* du système d'équations (4.53), par le gradient de l'énergie désirée (4.9), est donnée par l'équation (4.11).

avec

$$\nabla H_d = [C_S\tilde{x}_1; L_{FC}\tilde{x}_2; C_{DL}\tilde{x}_3; L_{DL}\tilde{x}_4; C_{SC}\tilde{x}_5; L_{SC}\tilde{x}_6; L_B\tilde{x}_7; L_L\tilde{x}_8]^T \quad (4.54)$$

et

$$[\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & -\frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & \frac{\mu_3}{C_{DL} L_B} & -\frac{1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & -\frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & 0 & \frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_3}{C_{DL} L_B} & 0 & 0 & 0 & -\frac{r_B}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_S} [(\mu_1 - \bar{\mu}_1)\bar{x}_2] \\ \frac{1}{C_{FC}} [(\bar{\mu}_1 - \mu_1)\bar{x}_1] \\ \frac{1}{C_{DL}} [(\mu_2 - \bar{\mu}_2)\bar{x}_6 + (\mu_3 - \bar{\mu}_3)\bar{x}_7] \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_{SC}} [(\bar{\mu}_2 - \mu_2)\bar{x}_3] \\ \frac{1}{L_B} [(\bar{\mu}_3 - \mu_3)\bar{x}_3] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Les lois de commande suivantes sont proposées :

$$\begin{cases} U_{FC} = \bar{U}_{FC} \\ U_{SC} = \bar{U}_{SC} - r\tilde{x}_6 \\ U_B = \bar{U}_B - r\tilde{x}_7 \end{cases} \quad (4.57)$$

En utilisant les lois de commande précédentes (4.52) et (4.57), la fonction de la dérivée de l'erreur devient sous la forme de l'équation (4.17).

Où

$$[\mathcal{J}(\mu) - \mathcal{R}'] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & -\frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_1}{C_S L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & \frac{\mu_3}{C_{DL} L_B} & -\frac{1}{C_{DL} L_L} \\ \frac{1}{C_S L_{DL}} & 0 & -\frac{1}{C_{DL} L_{DL}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_2}{C_{DL} L_{SC}} & 0 & \frac{1}{C_{SC} L_{SC}} & -\frac{rV_d}{L_{SC}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\mu_3}{C_{DL} L_B} & 0 & 0 & 0 & -\frac{r_B + rV_d}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DL} L_L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

$$\mathcal{R}' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; 0; 0; \frac{rV_d}{L_{SC}^2}; \frac{r_B + rV_d}{L_B^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = \mathcal{R}'^T \quad (4.59)$$

$$A' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r(\bar{x}_6 \tilde{x}_6 + \bar{x}_7 \tilde{x}_7)}{C_{DL}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r\bar{x}_6}{C_{DL} L_{SC}} & \frac{r\bar{x}_7}{C_{DL} L_B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \nabla H_d = \mathcal{F} \nabla H_d \quad (4.60)$$

$$[\mathcal{R}' - \mathcal{F}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r\bar{x}_6}{C_{DL}L_{SC}} & -\frac{r\bar{x}_7}{C_{DL}L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{rV_d}{L_{SC}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r_B + rV_d}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_L}{L_L^2} \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

De la même façon que nous avons prouvé la stabilité dans le cas précédent. Donc, La matrice  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est définie semi-négative si et seulement si toutes ses valeurs propres sont négative. La matrice  $[\mathcal{F} - \mathcal{R}']$  est une matrice triangulaire supérieure dont ses valeurs propres sont négatives :  $0, 0, 0, 0, 0, -\frac{rV_d}{L_{SC}^2}, -\frac{r_B + rV_d}{L_B^2}, -\frac{R_L}{L_L^2}$ , tandis que les constantes  $r, V_d, L_{SC}, r_B, L_B, R_L$  et  $L_L$  sont positives. Alors, le système est globalement stable en boucle fermée.

## 4.6.2 Résultats de simulation

Pour se concentrer sur la validité de notre stratégie de commande et après plusieurs essais de simulation. Les variations de la charge ont été choisi afin de tester les réactions des sources dans différentes situations. Nous avons utilisé les variation de la charge  $R_L$  illustrée auparavant (Figure (4.9)) pour les cas où la charge fonctionne comme récepteur ou générateur.

### 4.6.2.1 Charge fonctionne comme un récepteur

La figure (4.23) présente le comportement de  $V_{DL}$ , sa référence  $V_d$  et le courant de la charge  $I_L$ . Nous pouvons observer que  $V_{DL}$  suit bien sa référence  $V_d$  sans erreur statique et avec un léger dépassement environ de 2%.

Les figures (4.24), (4.25) et (4.26) montrent les réponses des sources : de la pile à combustible,  $V_{FC}, I_{FC}$ , de la batterie  $V_B, I_B$  et du supercondensateur  $V_{SC}, I_{SC}$  respectivement. Lorsque la quantité d'hydrogène est en baisse, l'alimentation de la charge se fait par les trois sources en régimes transitoire et permanent. Les courants  $I_B$  et  $I_{SC}$  suivent ainsi ses signaux de référence  $\bar{I}_B$  et  $\bar{I}_{SC}$ .

N° de la règle	<b>Si</b>			<b>Alors</b>	
	$QH_2$	et	$SoC_{SC}$ et $SoC_B$	$\bar{I}_{SC}$	et $\bar{I}_B$
1	<i>Bas</i>		<i>Bas</i>	0	0
2	<i>Bas</i>		<i>Moy</i>	0	<i>Pos</i>
3	<i>Bas</i>		<i>Haut</i>	0	<i>GPos</i>
4	<i>Bas</i>		<i>Bas</i>	<i>Pos</i>	0
5	<i>Bas</i>		<i>Moy</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
6	<i>Bas</i>		<i>Haut</i>	<i>Pos</i>	<i>GPos</i>
7	<i>Bas</i>		<i>Bas</i>	<i>GPos</i>	0
8	<i>Bas</i>		<i>Moy</i>	<i>GPos</i>	<i>Pos</i>
9	<i>Bas</i>		<i>Haut</i>	<i>GPos</i>	<i>GPos</i>
10	<i>Moy</i>		<i>Bas</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
11	<i>Moy</i>		<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>
12	<i>Moy</i>		<i>Haut</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>
13	<i>Moy</i>		<i>Bas</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
14	<i>Moy</i>		<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>
15	<i>Moy</i>		<i>Haut</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>
16	<i>Moy</i>		<i>Bas</i>	<i>Pos</i>	<i>Neg</i>
17	<i>Moy</i>		<i>Moy</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
18	<i>Moy</i>		<i>Haut</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
19	<i>Haut</i>		<i>Bas</i>	<i>Neg</i>	<i>GNeg</i>
20	<i>Haut</i>		<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	0
21	<i>Haut</i>		<i>Haut</i>	<i>Neg</i>	<i>Pos</i>
22	<i>Haut</i>		<i>Bas</i>	<i>GNeg</i>	<i>GNeg</i>
23	<i>Haut</i>		<i>Moy</i>	<i>GNeg</i>	0
24	<i>Haut</i>		<i>Haut</i>	<i>GNeg</i>	<i>Pos</i>
25	<i>Haut</i>		<i>Bas</i>	0	<i>GNeg</i>
26	<i>Haut</i>		<i>Moy</i>	0	0
27	<i>Haut</i>		<i>Haut</i>	0	<i>Pos</i>

Tableau 4.7: La base des règles de la logique floue de la sources hybride FC/SC/Batterie ( $QH_2$ ,  $SoC_{SC}$  et  $SoC_B$  entrées du FLC et  $\bar{I}_{SC}$ ,  $\bar{I}_B$  sorties)

Les signaux commande  $U_{FC}$  du convertisseur Boost du  $FC$ ,  $U_{SC}$  du convertisseur Buck-Boost du supercondensateur et  $U_B$  du convertisseur Buck-Boost de la batterie sont présentés par la figure (4.27).

Les figures (4.28), (4.29) montrent les variations de  $QH_2$ ,  $SoC_{SC}$  et  $SoC_B$  selon les puissances fournis à la charge. La puissance de la charge est obtenue à partir du système hybride par la somme des puissances du  $FC$ ,  $SC$  et de la batterie.

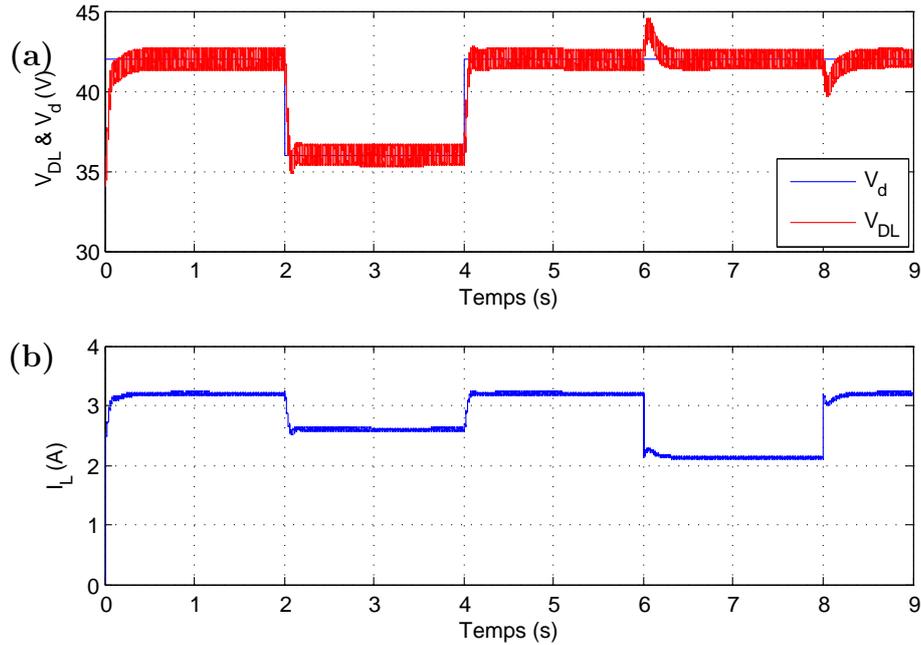


Figure 4.23: (a) Tension du bus continu et sa référence  
(b) Courant de la charge

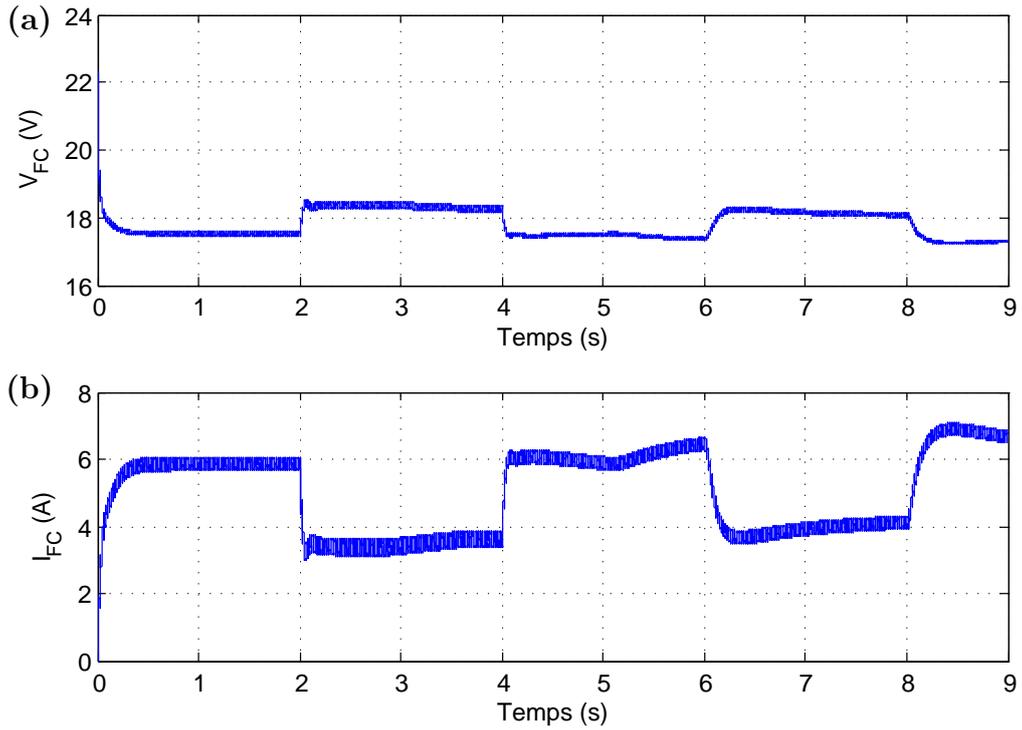


Figure 4.24: (a) Tension du FC. (b) Courant du FC

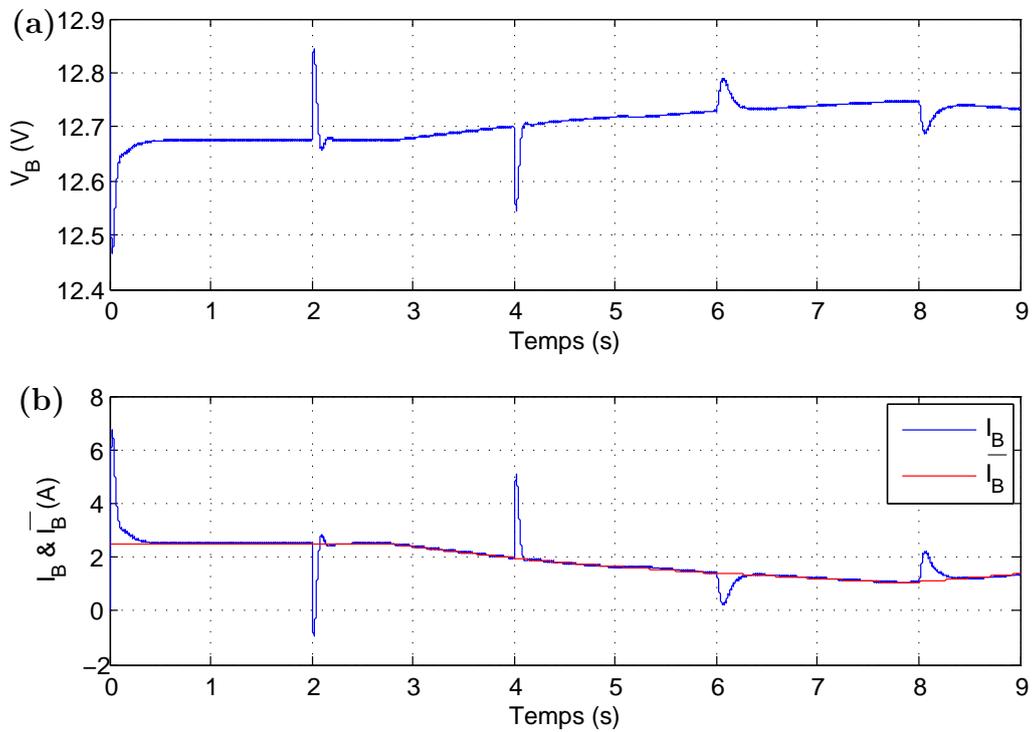


Figure 4.25: (a) Tension de la batterie  
(b) Courant de la batterie et sa référence

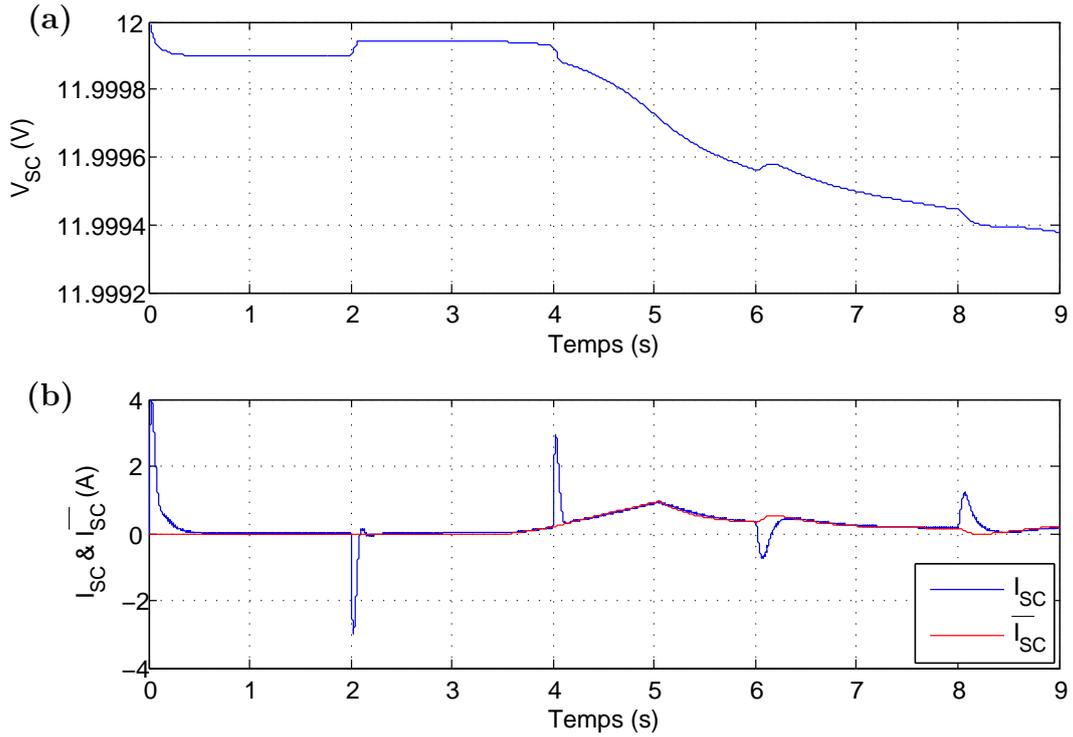


Figure 4.26: (a) Tension de SC. (b) Courant de SC et sa référence

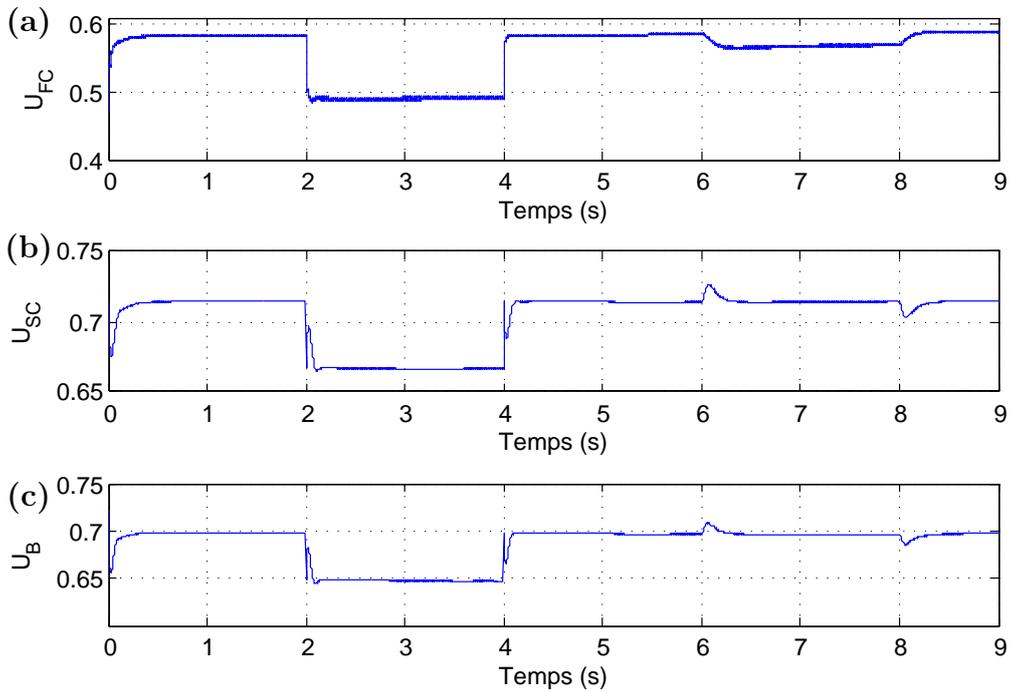


Figure 4.27: (a) Commande du convertisseur Boost du FC  
 (b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie  
 (c) Commande du convertisseur Buck-Boost du SC

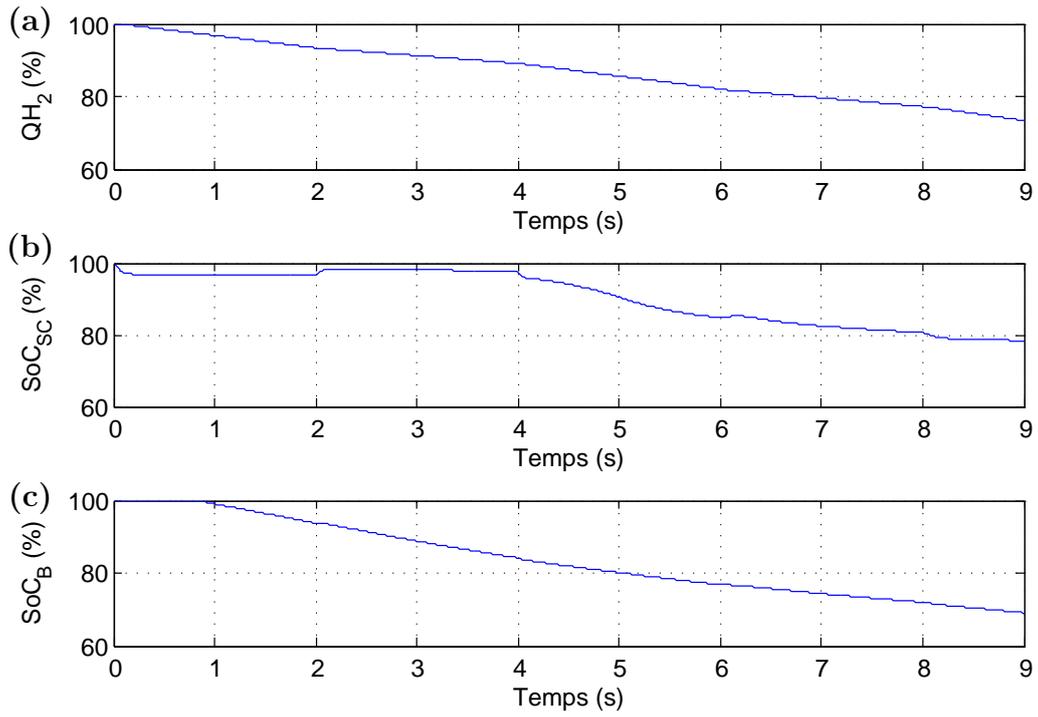


Figure 4.28: (a)  $QH_2$  du FC. (b)  $SoC$  du SC  
 (c)  $SoC$  de la batterie

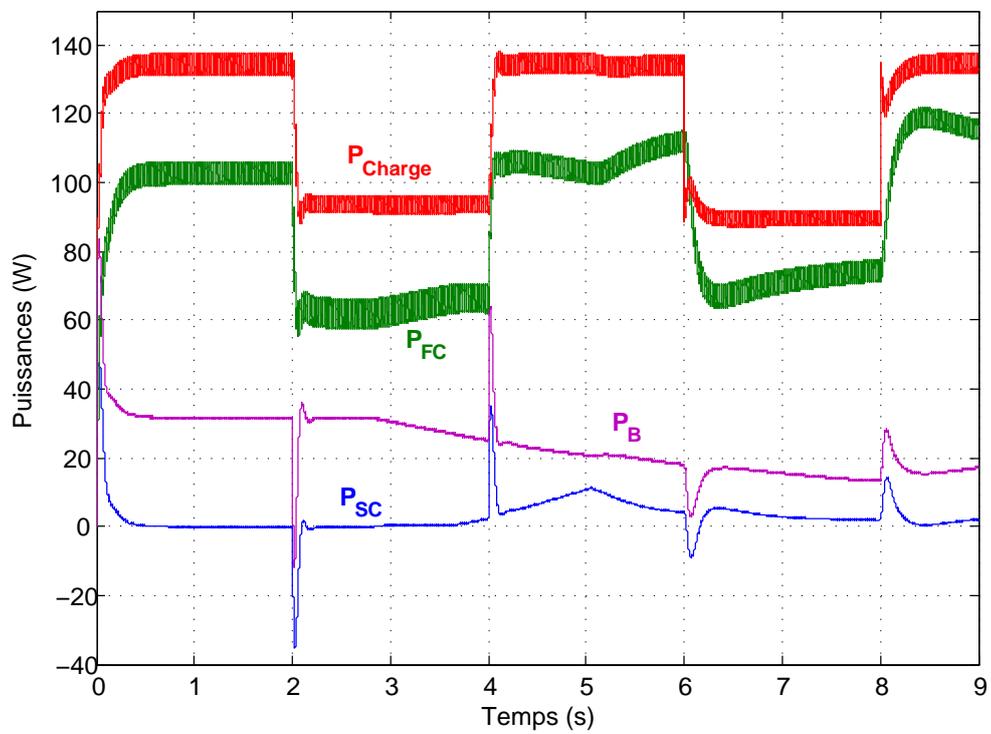


Figure 4.29: Transfert de puissances

#### 4.6.2.2 Charge fonctionne comme un générateur

Dans tous les tests précédents; la stratégie de commande proposée donne des résultats très acceptables mais uniquement quand les trois sources alimentent la charge. Nous prenons par exemple la règle N°26 du tableau (4.7) :

*Si*  $QH_2$  est Haut et  $SoC_{SC}$  est Haut et  $SoC_B$  est Moy **alors**  $\bar{I}_{SC} = 0$  et  $\bar{I}_B = 0$

C-à-d, qu'on peut pas récupérer l'énergie sous ces conditions!!!

Pour cela, nous proposons d'introduire le courant de la charge  $I_L$  comme une quatrième entrée au contrôleur flou, mais le nombre de règles devient  $3^4 = 81$  règles. Afin de réduire le nombre de règles, nous proposons que la pile à combustible et la batterie alimentent la charge pendant les régimes transitoire et permanent à cause de ses densités d'énergie élevées, alors que le supercondensateur alimente la charge juste aux moments des transitoires à cause de sa densité de puissance élevée. On aura alors un nouveau tableau de règles (4.8) et  $\bar{I}_{SC} = 0$ .

Dans cette partie, nous avons fixé la tension  $V_d$  à 42V et varié la force électromotrice de la charge  $E_L$  à une valeur supérieur à  $V_d$  pour avoir un courant négatif de la charge et aussi avec les mêmes variations de  $R_L$ .  $E_L$  est changée dans l'intervalle de [2s, 4s] de 10V à 50V et puis à 10V comme le montre la figure (4.30).

De la figure (4.31), nous pouvons remarquer que la tension du bus continu  $V_{DL}$  atteint sa référence avec un court temps de réponse de l'ordre de 0.15s et des pics de l'ordre de 12% à cause des variations brusques de  $E_L$ . Le courant de charge converge toujours rapidement a sa valeur de l'équilibre  $\frac{V_d - E_L}{R_L}$ .

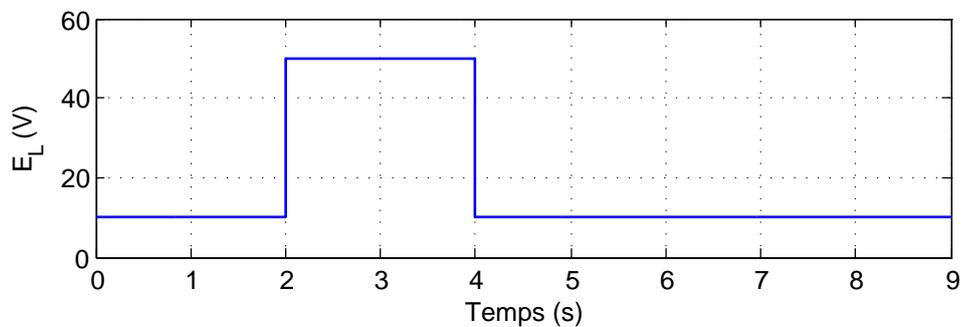


Figure 4.30: Changement de la force électromotrice de la charge

N° de la règle	<i>Si</i>			<i>Alors</i>
	$QH_2$	et $SoC_B$	et $I_L$	$\bar{I}_B$
1	<i>Bas</i>	<i>Bas</i>	<i>Neg</i>	<i>GNeg</i>
2	<i>Bas</i>	<i>Bas</i>	0	0
3	<i>Bas</i>	<i>Bas</i>	<i>Pos</i>	0
4	<i>Bas</i>	<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
5	<i>Bas</i>	<i>Moy</i>	0	0
6	<i>Bas</i>	<i>Moy</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
7	<i>Bas</i>	<i>Haut</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
8	<i>Bas</i>	<i>Haut</i>	0	0
9	<i>Bas</i>	<i>Haut</i>	<i>Pos</i>	<i>GPos</i>
10	<i>Moy</i>	<i>Bas</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
11	<i>Moy</i>	<i>Bas</i>	0	0
12	<i>Moy</i>	<i>Bas</i>	<i>Pos</i>	0
13	<i>Moy</i>	<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>GNeg</i>
14	<i>Moy</i>	<i>Moy</i>	0	0
15	<i>Moy</i>	<i>Moy</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
16	<i>Moy</i>	<i>Haut</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
17	<i>Moy</i>	<i>Haut</i>	0	0
18	<i>Moy</i>	<i>Haut</i>	<i>Pos</i>	<i>GPos</i>
19	<i>Haut</i>	<i>Bas</i>	<i>Neg</i>	<i>GNeg</i>
20	<i>Haut</i>	<i>Bas</i>	0	0
21	<i>Haut</i>	<i>Bas</i>	<i>Pos</i>	<i>Pos</i>
22	<i>Haut</i>	<i>Moy</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
23	<i>Haut</i>	<i>Moy</i>	0	0
24	<i>Haut</i>	<i>Moy</i>	<i>Pos</i>	<i>GPos</i>
25	<i>Haut</i>	<i>Haut</i>	<i>Neg</i>	<i>Neg</i>
26	<i>Haut</i>	<i>Haut</i>	0	0
27	<i>Haut</i>	<i>Haut</i>	<i>Pos</i>	<i>GPos</i>

Tableau 4.8: La base des règles de la logique floue de la sources hybride FC/SC/Batterie ( $QH_2$ ,  $SoC_B$  et  $I_L$  entrées du  $FLC$  et  $\bar{I}_B$  sortie)

La figure (4.32) montre les réponses de la pile à combustible  $V_{FC}$  et  $I_{FC}$ , nous distinguons alors que à la phase de récupération d'énergie le courant de pile est nul.

Les figures (4.33) et (4.34) représentent les réponses de tension et courant de la batterie et du supercondensateur respectivement. Il est remarquable que la batterie alimente la charge pendant les régimes transitoire et permanent et récupère l'énergie alors que le supercondensateur alimente la charge uniquement en régime transitoire selon les conditions proposées à priori et les courants suivent parfaitement ses références.

Les signaux commande  $U_{FC}$  du convertisseur Boost du  $FC$ ,  $U_{SC}$  du convertisseur Buck-Boost du supercondensateur et  $U_B$  du convertisseur Buck-Boost de la batterie sont présentés par la figure (4.35).

La figure (4.36) montre les variations de  $QH_2$ ,  $SoC_{SC}$  et  $SoC_B$  selon les puissances fournis à la charge. La puissance de la charge est obtenue par la somme des puissances du  $FC$ ,  $SC$  et de la batterie. Pendant la phase de récupération d'énergie, la puissance fournie par la charge est récupérée par la batterie comme le montre la figure (4.37).

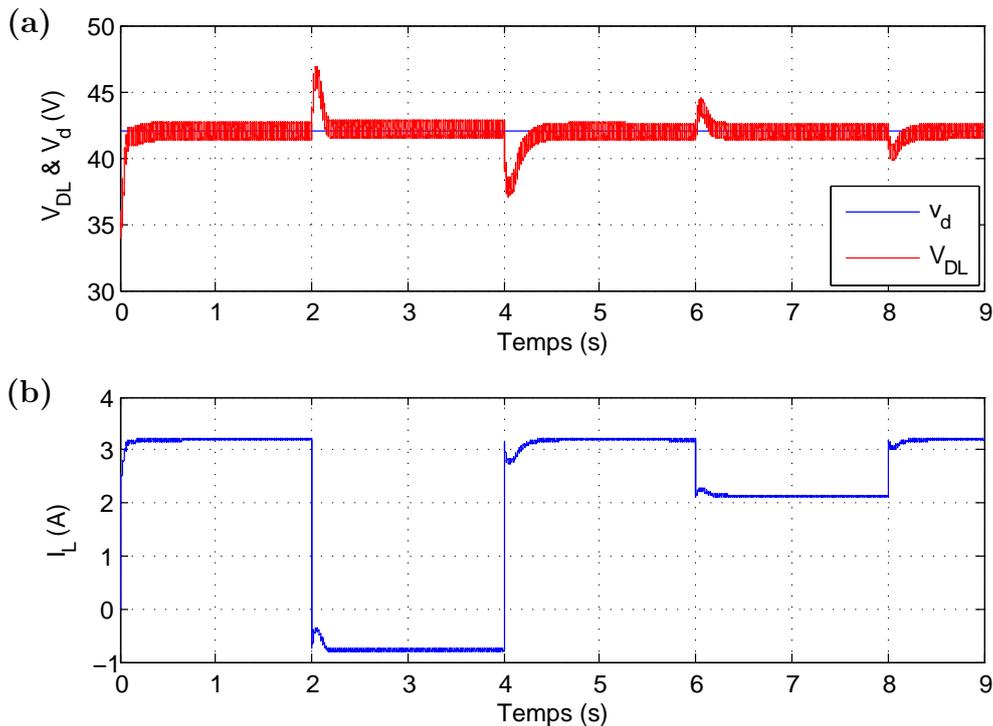


Figure 4.31: Tension du bus continu et sa référence  
Courant de la charge

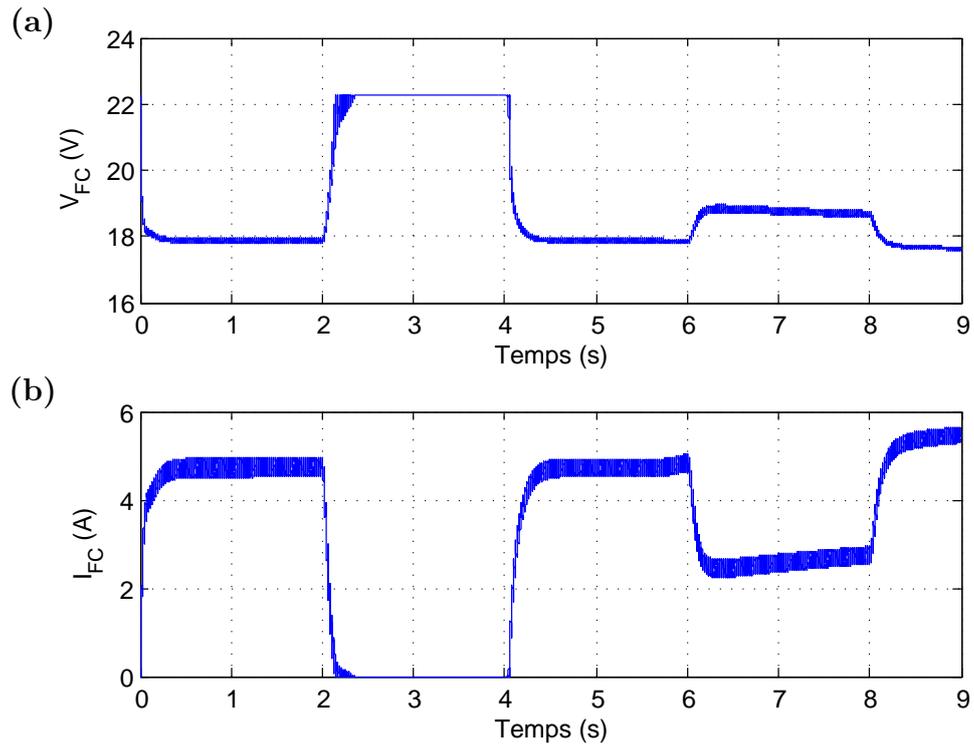


Figure 4.32: (a) Tension du *FC*. (b) Courant du *FC*

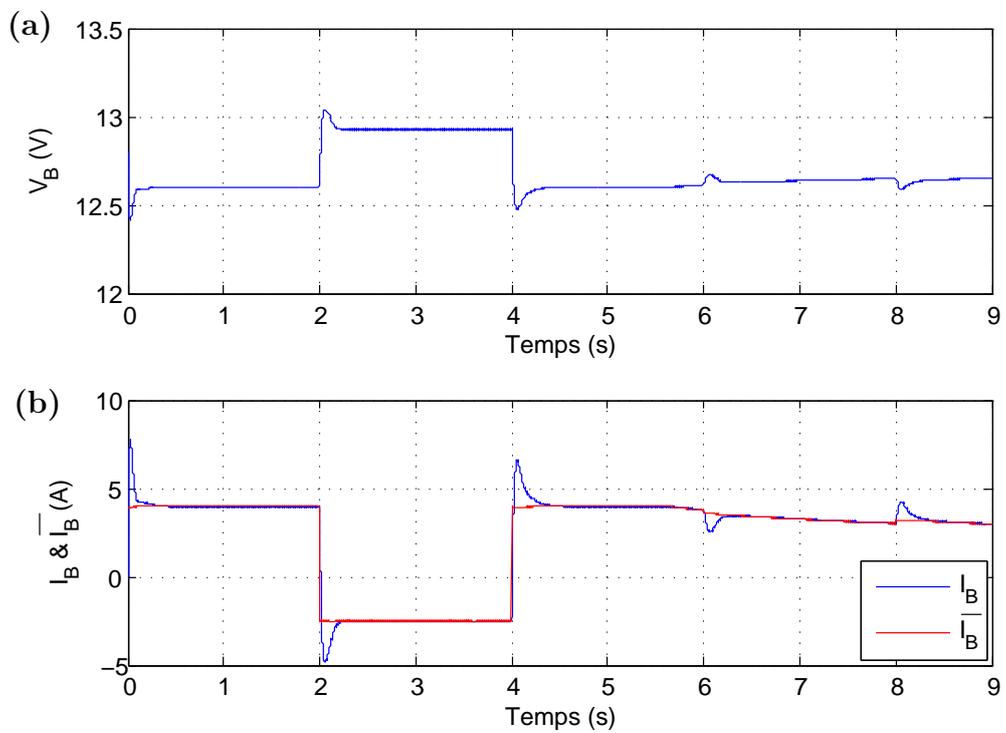


Figure 4.33: (a) Tension de la batterie  
(b) Courant de la batterie et sa référence

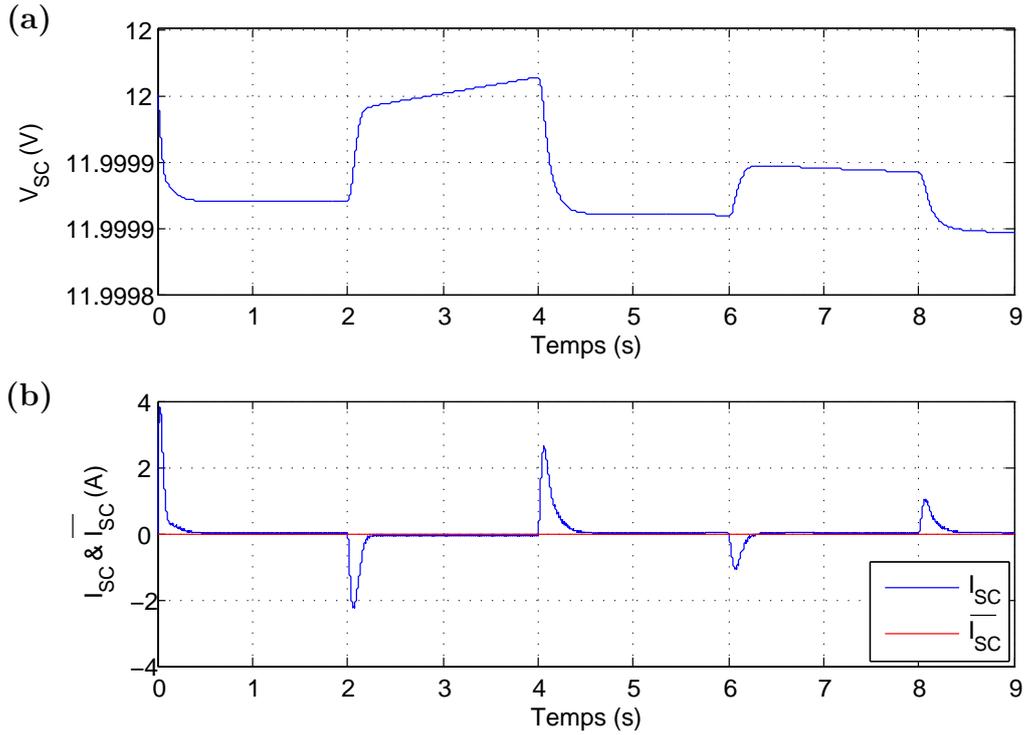


Figure 4.34: (a) Tension de SC. (b) Courant de SC et sa référence

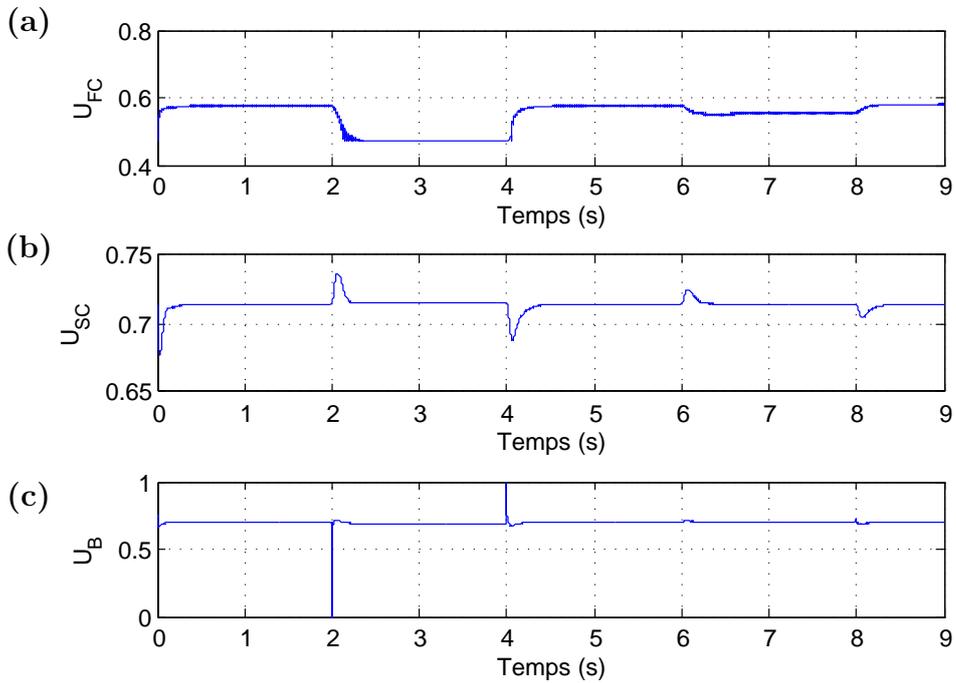


Figure 4.35: (a) Commande du convertisseur Boost du FC  
 (b) Commande du convertisseur Buck-Boost de la batterie  
 (c) Commande du convertisseur Buck-Boost du SC

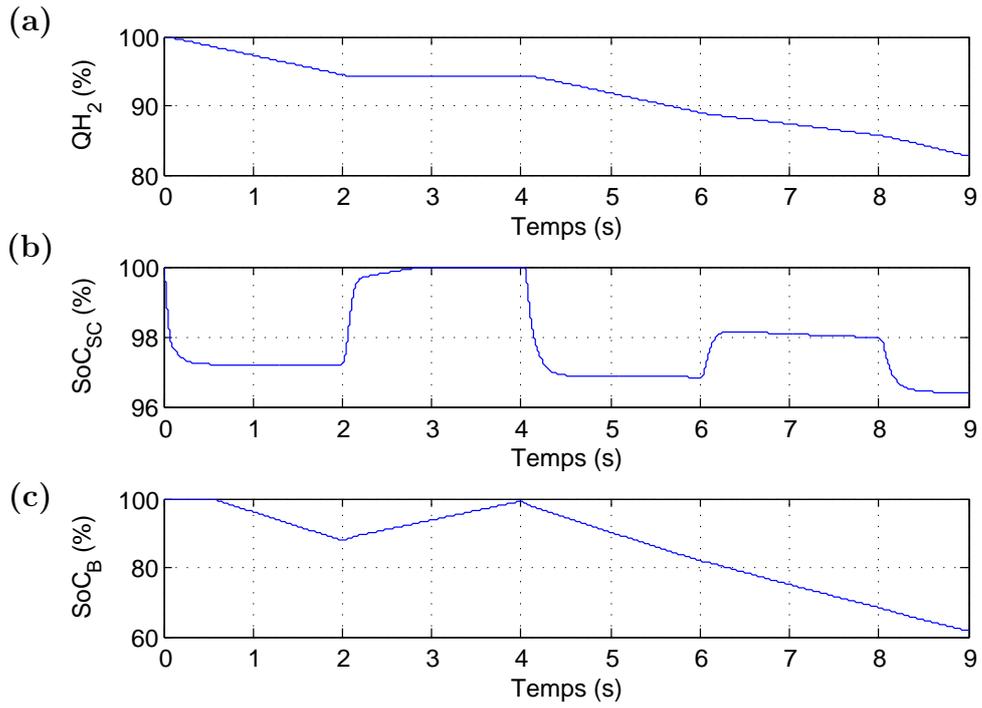


Figure 4.36: (a)  $QH_2$  du FC. (b)  $SoC$  du SC  
(c)  $SoC$  de la batterie

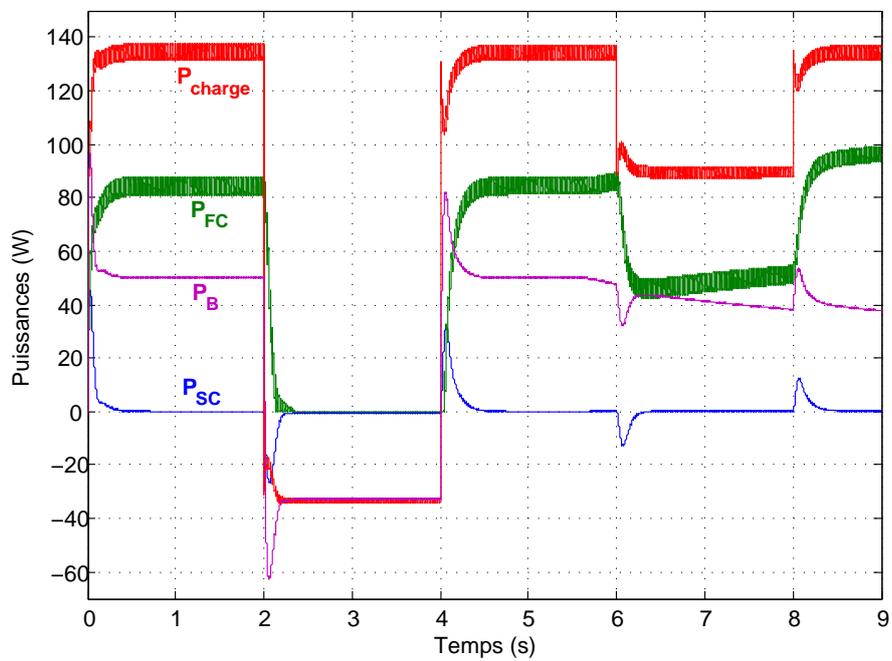


Figure 4.37: Transfert de puissances

## **4.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de la stabilisation par la commande dite par passivité des différents systèmes hybrides multi-sources décrits par des équations d'état non linéaire.

Après la phase de modélisation, nous avons conçu une stratégie de commande adéquate pour assurer la stabilité du système globale. Ces lois de commande ont pour but la poursuite d'un modèle de référence généré par un contrôleur flou. Cette stratégie de commande assure la régulation de la tension du bus continu (DC Link) en fonction des besoins de la charge par la répartition de la puissance entre les sources.

Après plusieurs essais en simulation, nous avons déterminé les règles adéquats du contrôleur flou pour estimer les courants de références des sources réversibles utilisés dans la commande basée sur la passivité.

Les résultats de simulation montrent la robustesse et les performances dynamiques des contrôleurs proposés vis à vis les variations de la charge et montrent aussi l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie.

# Conclusion Générale

Ce travail de thèse de doctorat s'inscrit dans la thématique «Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources». Il a pour objectif l'étude de stratégies de commande et de la gestion de l'énergie des différents systèmes hybrides composés d'une pile à combustible comme source principale et d'autres sources réversibles (Batterie et supercondensateurs) comme sources auxiliaires. Ces systèmes sont dédiés à la traction dans les véhicules électriques à pile à combustible, en minimisant autant que possible la consommation d'hydrogène.

À ce propos, des architectures d'association hybrides sont étudiées. Ces architectures sont équipées d'une pile à combustible liée au bus continu via un hacheur élévateur. Aussi, la nécessité d'utiliser des systèmes de stockage de l'énergie hybridés avec la PEMFC, afin d'avoir un système permettant un fonctionnement optimal, est montrée. Les moyens de stockage sont connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC. Ces convertisseurs ont permis de réguler la tension du bus continu et de gérer le transfert de la puissance vers la charge.

Parmi les différentes techniques de la gestion de l'énergie utilisées dans les véhicules électriques à FC, nous avons opté, dans ce travail, pour deux commandes: le contrôleur flou et le contrôleur basé sur la passivité. Nous avons ainsi, en utilisant le contrôleur flou, pu optimiser la consommation de l'hydrogène par l'exploitation des moyens de stockage durant les phases permanentes au lieu de ne les utiliser que pendant les phases transitoires. De ce fait, nous permettons d'éviter le sur-dimensionnement de la pile à combustible qui devient moins sollicitée, et par conséquent, de gagner en coût du véhicule. La deuxième commande, le contrôleur basé sur la passivité utilisant l'approche *IDA-PBC*, a pour rôle la modification de la matrice d'amortissement des systèmes hamiltoniens de nos systèmes hybrides étudiés pour forcer les courants des moyens de stockage de suivre les références générées par le contrôleur flou.

L'utilisation de ces deux contrôleurs donne une performance tout à fait acceptable en offrant la robustesse nécessaire face aux variations de la charge. Les résultats obtenus montrent qu'ils permettent une bonne répartition de la puissance entre les sources et la

charge.

## Perspectives de recherche

Les problèmes, évoqués dans cette thèse, ouverts à la recherche sont nombreux. Nous évoquons ici les plus importants:

- Valider en pratique les résultats obtenus par simulation.
- Utiliser un contrôleur robuste tel que le  $H_\infty$  pour forcer les courants de suivre ses références.
- Représenter les systèmes étudiés par les multi-modèles flous de Takagi-Sugeno et par la suite utiliser la commande PDC (Parallel Distributed Controller).
- Remplacer les convertisseurs par des hacheurs entrelacés (IBC : Interleaved Boost Converter) et hacheurs entrelacés flottants (FIBC : Floating Interleaved Boost Converter).

# Bibliography

- [ABH<sup>+</sup>10] MY Ayad, M Becherif, A Henni, A Aboubou, M Wack, and S Laghrouche. Passivity-based control applied to dc hybrid power source using fuel cell and supercapacitors. *Energy Conversion and Management*, 51(7):1468–1475, 2010. (pages [14](#), [79](#), [80](#), [86](#), [87](#), [96](#)).
- [ABH11] MY Ayad, M Becherif, and A Henni. Vehicle hybridization with fuel cell, supercapacitors and batteries by sliding mode control. *Renewable Energy*, 36(10):2627–2634, 2011. (pages [3](#), [14](#)).
- [ABM<sup>+</sup>95] John C Amphlett, RM Baumert, Ronald F Mann, Brant A Peppley, Pierre R Roberge, and Thomas J Harris. Performance modeling of the ballard mark iv solid polymer electrolyte fuel cell i. mechanistic model development. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(1):1–8, 1995. (page [26](#)).
- [ABP<sup>+</sup>07] MY Ayad, M Becherif, D Paire, A Djerdir, and A Miraoui. Passivity-based control of hybrid power sources using fuel cell, supercapacitors, and batteries on the dc link for energy traction system. In *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International*, volume 1, pages 453–458. IEEE, 2007. (pages [3](#), [96](#)).
- [AKHB04] Kodjo Agbossou, Mohanlal Kolhe, Jean Hamelin, and Tapan K Bose. Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 19(3):633–640, 2004. (page [36](#)).
- [Akl08] Cossi Rockys Akli. *Conception systématique d'une locomotive hybride autonome: application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique LhyDIE développée par la SNCF*. PhD thesis, 2008. (pages [iv](#), [15](#), [36](#)).

- [ATB10] AL Allègre, R Trigui, and A Bouscayrol. Different energy management strategies of hybrid energy storage system (hess) using batteries and supercapacitors for vehicular applications. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010. (page 37).
- [Aya04] Mohamed-Yacine Ayad. *Mise en œuvre des supercondensateurs dans les sources hybrides continues*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2004. (page 33).
- [Azi10] Toufik Azib. *Contribution à l'étude d'électro-générateurs à pile à combustible: conceptions d'architectures et de leurs commandes*. PhD thesis, Paris 11, 2010. (page 24).
- [BADCF06] Carles Batlle Arnau, Arnau Dòria Cerezo, and Enric Fossas Colet. Improving the robustness of hamiltonian passive control. 2006. (page 70).
- [BAW10] Mohamed Becherif, Mohamed-Yacine Ayad, and Maxime Wack. Control study of fuel cell, battery and solar hybridization power sources. In *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2010 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2010. (page 78).
- [Ber00] Alexandre de Bernardinis. *Étude et optimisation d'un ensemble alternateur à aimants-redresseur commandé: application à un véhicule hybride*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2000. (page 9).
- [Ber07] Jérôme Bernard. *Véhicules hybrides à pile à combustible: dimensionnement et stratégies de commande*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007. (page 29).
- [BH10] M Becherif and D Hissel. Mppt of a pemfc based on air supply control of the motocompressor group. *international journal of hydrogen energy*, 35(22):12521–12530, 2010. (page 25).
- [BMS11] Carles Batlle, Imma Massana, and Ester Simó. Representation of a general composition of dirac structures. In *Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on*, pages 5199–5204. IEEE, 2011. (page 61).

- [Cam07] Mamadou Baïlo Camara Camara. *Supercondensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride: modélisation, étude des convertisseurs et commande*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2007. (pages [35](#), [36](#)).
- [Can02] Denis Candusso. *Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2002. (pages [iv](#), [32](#), [33](#)).
- [CFMS13] Marcelo Carmo, David L Fritz, Jürgen Mergel, and Detlef Stolten. A comprehensive review on pem water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12):4901–4934, 2013. (page [2](#)).
- [CGB10] RE Clarke, Sarb Giddey, and SPS Badwal. Stand-alone pem water electrolysis system for fail safe operation with a renewable energy source. *International journal of hydrogen energy*, 35(3):928–935, 2010. (page [2](#)).
- [Cha99] Philippe Chapoulie. *Modélisation systémique pour la conception de véhicules électriques multi-sources Application aux véhicules équipés de générateurs photovoltaïques ou de supercondensateurs*. PhD thesis, 1999. (page [15](#)).
- [CHE06] Woojin Choi, Jo W Howze, and Prasad Enjeti. Fuel-cell powered uninterruptible power supply systems: Design considerations. *Journal of Power Sources*, 157(1):311–317, 2006. (page [36](#)).
- [CHF10] S Caux, W Hankache, M Fadel, and D Hissel. On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems. *International Journal of hydrogen energy*, 35(5):2134–2143, 2010. (pages [12](#), [13](#)).
- [DBC06] Jürgen Dollmayer, Nicola Bundschuh, and Udo B Carl. Fuel mass penalty due to generators and fuel cells as energy source of the all-electric aircraft. *Aerospace science and technology*, 10(8):686–694, 2006. (page [36](#)).
- [Des08] Blaise Destraz. *Assistance énergétique à base de supercondensateurs pour véhicules à propulsion électrique et hybride*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008. (page [36](#)).

- [Dev12] Nathalie Devillers. *Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2012. (page [28](#)).
- [DK14] Serkan Dusmez and Alireza Khaligh. A supervisory power-splitting approach for a new ultracapacitor–battery vehicle deploying two propulsion machines. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 10(3):1960–1971, 2014. (page [13](#)).
- [DLR06] Blaise Destraz, Yannick Louvrier, and Alfred Rufer. High efficient interleaved multi-channel dc/dc converter dedicated to mobile applications. In *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, volume 5, pages 2518–2523. IEEE, 2006. (page [36](#)).
- [DM11] Reed T Doucette and Malcolm D McCulloch. A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 196(3):1163–1170, 2011. (page [2](#)).
- [DO02] Juan W Dixon and Micah E Ortuzar. Ultracapacitors+ dc-dc converters in regenerative braking system. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 17(8):16–21, 2002. (page [36](#)).
- [DW09] Chirag Desai and Sheldon S Williamson. Comparative study of hybrid electric vehicle control strategies for improved drivetrain efficiency analysis. In *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2009. (page [16](#)).
- [EEG<sup>+</sup>09] Y Eren, O Erdinc, H Gorgun, M Uzunoglu, and B Vural. A fuzzy logic based supervisory controller for an fc/uc hybrid vehicular power system. *international journal of hydrogen energy*, 34(20):8681–8694, 2009. (page [13](#)).
- [EVUA09] O Erdinc, B Vural, M Uzunoglu, and Y Ates. Modeling and analysis of an fc/uc hybrid vehicular power system using a wavelet-fuzzy logic based load

- sharing and control algorithm. *International journal of hydrogen energy*, 34(12):5223–5233, 2009. (pages [12](#), [13](#)).
- [FCK<sup>+</sup>14] Dima Fares, Riad Chedid, Sami Karaki, Rabih Jabr, Ferdinand Panik, Hugo Gabele, and Ying Huang. Optimal power allocation for a fchv based on linear programming and pid controller. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36):21724–21738, 2014. (page [14](#)).
- [FCP<sup>+</sup>15] Dima Fares, Riad Chedid, Ferdinand Panik, Sami Karaki, and Rabih Jabr. Dynamic programming technique for optimizing fuel cell hybrid vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, page Article In Press, 2015. (page [14](#)).
- [Fer09] Diego Feroldi. *Control and design of PEM fuel cell-based systems*. PhD thesis, Université Polytechnique de Catalogne, 2009. (pages [iv](#), [24](#)).
- [Fon05] Guillaume Fontès. *Modélisation et caractérisation de la pile PEM pour l'étude des interactions avec les convertisseurs statiques*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005. (page [26](#)).
- [GBC10] Sergio Grammatico, Andrea Balluchi, and Ettore Cosoli. A series-parallel hybrid electric powertrain for industrial vehicles. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010. (pages [9](#), [10](#)).
- [GBMvdS00] Goran Golo, Peter C Breedveld, Bernhard M Maschke, and Arjan J van der Schaft. Input output representations of dirac structures and junction structures in bond graphs. In *Proc. 14th Int. Symp. on Math. Theory of Networks and Systems (MTNS 2000), Perpignan, France, 2000*. (page [62](#)).
- [GFG05] Carlos Gaviria, Enric Fossas, and Robert Griñó. Robust controller for a full-bridge rectifier using the ida approach and gssa modeling. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 52(3):609–616, 2005. (page [70](#)).

- [GJD<sup>+</sup>05] Lijun Gao, Zhenhua Jiang, Roger Dougal, et al. Evaluation of active hybrid fuel cell/battery power sources. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 41(1):346–355, 2005. (page 44).
- [GJL08] Dawei Gao, Zhenhua Jin, and Qingchun Lu. Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus. *Journal of Power Sources*, 185(1):311–317, 2008. (page 12).
- [Han08] Walid Hankache. *Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2008. (pages 8, 25).
- [He06] Xiaolai He. *Development and validation of a hybrid electric vehicle with hydrogen internal combustion engine*. PhD thesis, Texas Tech University, 2006. (page 8).
- [HVL<sup>+</sup>10] A Hammar, Pascal Venet, Richard Lallemand, Gerard Coquery, and Gerard Rojat. Study of accelerated aging of supercapacitors for transport applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(12):3972–3979, 2010. (page 38).
- [JZW10] Li-Qiang Jin, Xia-hua Zeng, and Wei Wang. The control strategy and cost analysis for series plug-in hybrid electric vehicle. In *Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference on*, volume 2, pages 350–354. IEEE, 2010. (page 7).
- [KEK10] Lakmal Karunarathne, John T Economou, and Kevin Knowles. Model based power and energy management system for pem fuel cell/li-ion battery driven propulsion system. In *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference on*, pages 1–6. IET, 2010. (page 73).
- [Ker09] Saida Kermani. *Gestion énergétique des véhicules hybrides: de la simulation à la commande temps réel*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2009. (pages 9, 14).

- [Kes07] Johannes Theodorus Bernard Anna Kessels. Energy management for automotive power nets, 2007. (pages [7](#), [8](#)).
- [KLSC95] Junbom Kim, Seong-Min Lee, Supramaniam Srinivasan, and Charles E Chamberlin. Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation. *Journal of the Electrochemical Society*, 142(8):2670–2674, 1995. (page [26](#)).
- [KSLK08] Minjin Kim, Young-Jun Sohn, Won-Yong Lee, and Chang-Soo Kim. Fuzzy control based engine sizing optimization for a fuel cell/battery hybrid mini-bus. *Journal of Power Sources*, 178(2):706–710, 2008. (page [36](#)).
- [Lac04] Jérôme Lachaize. *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction*. PhD thesis, 2004. (pages [24](#), [25](#), [32](#), [40](#)).
- [LCB<sup>+</sup>08] Srdjan M Lukic, Jian Cao, Ramesh C Bansal, Fernando Rodríguez, and Ali Emadi. Energy storage systems for automotive applications. *Industrial electronics, IEEE Transactions on*, 55(6):2258–2267, 2008. (page [36](#)).
- [LDM03] James Larminie, Andrew Dicks, and Maurice S McDonald. *Fuel cell systems explained*, volume 2. Wiley New York, 2003. (pages [26](#), [42](#)).
- [LJCH06] Jinhee Lee, Jinsang Jo, Sewan Choi, and Soo-Bin Han. A 10-kw soft low-voltage battery hybrid power conditioning system for residential use. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 21(2):575–585, 2006. (page [36](#)).
- [LL09] Chun-Yan Li and Guo-Ping Liu. Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles. *Journal of power sources*, 192(2):525–533, 2009. (page [13](#)).
- [LXH<sup>+</sup>09] Xiangjun Li, Liangfei Xu, Jianfeng Hua, Xinfan Lin, Jianqiu Li, and Ming-gao Ouyang. Power management strategy for vehicular-applied hybrid fuel cell/battery power system. *Journal of Power Sources*, 191(2):542–549, 2009. (pages [12](#), [13](#)).

- [Mak08] Hattab Maker. *Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride: association Pile à Combustible et Supercondensateurs*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2008. (pages [iv](#), [33](#)).
- [Mal14] Andreas A Malikopoulos. Supervisory power management control algorithms for hybrid electric vehicles: a survey. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 15(5):1869–1885, 2014. (pages [10](#), [11](#)).
- [Mar09] Didier Marx. *Contribution à l'étude de la stabilité des systèmes électrotechniques*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2009. (pages [18](#), [19](#)).
- [MBA<sup>+</sup>13] M. Mohammedi, M. Becherif, M.Y. Ayad, O. Kraa, A. Aboubou, and M. Bahri. Passivity based control and fuzzy logic estimation applied to dc hybrid power source using fuel cell and supercapacitor. In *Systems and Control (ICSC), 2013 3rd International Conference on*, pages 77–82. IEEE, 2013. (pages [39](#), [73](#), [74](#)).
- [MBA<sup>+</sup>15] M Mohammedi, M Becherif, A Aboubou, O Kraa, MY Ayad, and M Bahri. Fuzzy logic and passivity based control applied to hybrid dc power source using fuel cell and battery. In *Systems and Control (ICSC), 2015 4th International Conference on*, pages 510–515. IEEE, 2015. (pages [44](#), [92](#)).
- [MKB<sup>+</sup>14] M Mohammedi, O Kraa, M Becherif, A Aboubou, MY Ayad, and M Bahri. Fuzzy logic and passivity-based controller applied to electric vehicle using fuel cell and supercapacitors hybrid source. *Energy Procedia*, 50:619–626, 2014. (pages [42](#), [84](#)).
- [Mon09] Maxime Montaru. *Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2009. (page [30](#)).
- [Mor13] Benoît Morin. *Hybridation d'une pile à combustible par des supercondensateurs: vers une solution passive et directe*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2013. (page [33](#)).

- [MRBLM14] T Mesbahi, N Rizoug, P Bartholomeüs, and P Le Moigne. Improved model of battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on thermo-electrical and aging behaviors. 2014. (page 37).
- [MSTV01] DRAGAN Maksimović, ALEKSANDAR M Stanković, V Joseph Thottuvelil, and George C Verghese. Modeling and simulation of power electronic converters. *Proceedings of the IEEE*, 89(6):898–912, 2001. (page 40).
- [Nor05] Erik Nordlund. *The four-quadrant transducer system: for hybrid electric vehicles*. PhD thesis, KTH, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005. (page 8).
- [NS13] Roberto Naldi and Ricardo G Sanfelice. Passivity-based control for hybrid systems with applications to mechanical systems exhibiting impacts. *Automatica*, 49(5):1104–1116, 2013. (page 62).
- [OG03] Romeo Ortega and E Garcia. Energy-shaping stabilization of dynamical systems. *Laboratoire des Signaux et Systèmes, SUPELEC France*, 2003. (page 68).
- [OGC04] Romeo Ortega and Eloisa Garcia-Canseco. Interconnection and damping assignment passivity-based control: A survey. *European Journal of control*, 10(5):432–450, 2004. (page 68).
- [OLNSR98] Romeo Ortega, Antonio Loría, Per Johan Nicklasson, and Herbertt Sira-Ramírez. Passivity-based control of euler-lagrange systems: Mechanical, electrical and electromechanical applications. *communications and control engineering*, 1998. (pages 4, 53).
- [OR12] Shane Overington and Sumedha Rajakaruna. Review of phev and hev operation and control research for future direction. In *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE International Symposium on*, pages 385–392. IEEE, 2012. (page 16).
- [OSGEB02] Romeo Ortega, Mark W Spong, Fabio Gómez-Estern, and Guido Blankenstein. Stabilization of a class of underactuated mechanical systems via

- interconnection and damping assignment. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 47(8):1218–1233, 2002. (page 70).
- [OVDSME02] Romeo Ortega, Arjan Van Der Schaft, Bernhard Maschke, and Gerardo Escobar. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled hamiltonian systems. *Automatica*, 38(4):585–596, 2002. (pages 4, 65, 68).
- [Pai10] Damien Paire. *Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2010. (pages iv, 31, 35).
- [Pas06] Ramkrishna Pasumarthu. *On analysis and control of interconnected finite- and infinite-dimensional physical systems*. PhD thesis, Twente University, 2006. (pages 54, 57, 62).
- [PPMTD11] Alireza Payman, Serge Pierfederici, Farid Meibody-Tabar, and Brayima Dakyo. Control of a low power electrical hybrid system supplied by a fuel cell and a supercapacitor pack. In *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pages 1244–1249. IEEE, 2011. (page 13).
- [RFBS11] Nassim Rizoug, Gilles Feld, Bertrand Barbedette, and Redha Sadoun. Association of batteries and supercapacitors to supply a micro-hybrid vehicle. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2011. (page 37).
- [RO03] H Rodriguez and R Ortega. Interconnection and damping assignment control of electromechanical systems. *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, 13(12):1095–1111, 2003. (page 70).
- [ROE01] Hugo Rodriguez, Romeo Ortega, and Gerardo Escobar. A new family of energy-based non-linear controllers for switched power converters. In *Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on*, volume 2, pages 723–727. IEEE, 2001. (page 70).

- [Rou08] Grégory Rousseau. *Véhicule hybride et commande optimale*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008. (pages 9, 10).
- [Sad13] Redha Sadoun. *Intérêt d'une Source d'Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain-dimensionnement et tests de cyclage*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2013. (pages 11, 30, 35, 37).
- [Sal07] Farzad Rajaei Salmasi. Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 56(5):2393–2404, 2007. (pages 11, 16).
- [SBAA13] A Saadi, M Becherif, A Aboubou, and MY Ayad. Comparison of proton exchange membrane fuel cell static models. *Renewable Energy*, 56:64–71, 2013. (page 26).
- [SCH00] AJ van der SCHAFT. Robust nonlinear control. port-controlled hamiltonian systems: Towards a theory for control and design of nonlinear physical systems. *Measurement and Control Journal*, 39(2):91–98, 2000. (pages 64, 67).
- [SDRT<sup>+</sup>05] J Scordia, M Desbois-Renaudin, R Trigui, B Jeanneret, F Badin, and C Plasse. Global optimisation of energy management laws in hybrid vehicles using dynamic programming. *International journal of vehicle design*, 39(4):349–367, 2005. (page 14).
- [SLB14] Daniel Sigmund, Andreas Lohner, and Magnus Boh. Simulation-based development of an energy-management-system for a drive train of a parallel hybrid electric vehicle. In *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International*, pages 822–827. IEEE, 2014. (page 9).
- [SMJHP12] Javier Solano Martínez, Robert I John, Daniel Hissel, and Marie-Cécile Péra. A survey-based type-2 fuzzy logic system for energy management in hybrid electrical vehicles. *Information Sciences*, 190:192–207, 2012. (page 12).

- [SMMH<sup>+</sup>13] Javier Solano Martínez, Jérôme Mulot, Fabien Harel, Daniel Hissel, Marie-Cécile Péra, Robert I John, and Michel Amiet. Experimental validation of a type-2 fuzzy logic controller for energy management in hybrid electrical vehicles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(7):1772–1779, 2013. (page 13).
- [SNCH<sup>+</sup>00] Philippe Stevens, Frédéric Novel-Cattin, Abdel Hammou, Claude Lamy, and Michel Cassir. Piles à combustible. *Techniques de l'ingénieur D*, 5:3340, 2000. (page 25).
- [Sol12] Javier Solano. *Modélisation et supervision des flux énergétiques à bord d'un véhicule hybride lourd: approche par logique floue de type-2*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2012. (pages 11, 13, 14).
- [Spr12] OR Sprangers. *Embedding machine learning into passivity theory: a port-Hamiltonian approach*. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2012. (page 65).
- [SRBLM13] R Sadoun, Nassim Rizoug, Patrick Bartholomeus, and Ph Le Moigne. Optimal architecture of the hybrid source (battery/supercapacitor) supplying an electric vehicle according to the required autonomy. In *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, pages 1–7. IEEE, 2013. (page 46).
- [TCS<sup>+</sup>09] Phatiphat Thounthong, Viboon Chunkag, Panarit Sethakul, Bernard Davat, and Melika Hinaje. Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 58(8):3892–3904, 2009. (pages 3, 30, 38, 48).
- [TDRS09] Phatiphat Thounthong, Bernard Davat, Stephane Rael, and Panarit Sethakul. Fuel cell high-power applications. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 3(1):32–46, 2009. (page 36).
- [THNCB10] Fernando Tiefensee, Mickaël Hilairret, Dorothée Normand Cyrot, and Olivier Bethoux. Sampled-data energetic management of a fuel cell/supercapacitor system. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010. (pages 2, 3, 38).

- [Tho05] Phatiphat Thounthong. *Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005. (pages [27](#), [36](#)).
- [THO<sup>+</sup>10] Reine J Talj, Daniel Hissel, Romeo Ortega, Mohamed Becherif, and Mickaël Hilairet. Experimental validation of a pem fuel-cell reduced-order model and a moto-compressor higher order sliding-mode control. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(6):1906–1913, 2010. (pages [22](#), [26](#)).
- [TJMP09] Rochdi Trigui, Bruno Jeanneret, Bertrand Malaquin, and Cedric Plasse. Performance comparison of three storage systems for mild hevs using phil simulation. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 58(8):3959–3969, 2009. (page [1](#)).
- [TPM<sup>+</sup>10] Phatiphat Thounthong, Serge Pierfederici, J-P Martin, Melika Hinaje, and Bernard Davat. Modeling and control of fuel cell/supercapacitor hybrid source based on differential flatness control. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(6):2700–2710, 2010. (page [13](#)).
- [TRD09] Phatiphat Thounthong, Stephane Rael, and Bernard Davat. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 193(1):376–385, 2009. (page [48](#)).
- [Tri10] Philip Tritzschler. *Optimisation de l'architecture électrique et gestion d'énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédiée à l'application agricole*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2010. (pages [11](#), [33](#)).
- [VAGB10] Manuel Jesús Vasallo, José Manuel Andújar, Covadonga García, and José Javier Brey. A methodology for sizing backup fuel-cell/battery hybrid power systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(6):1964–1975, 2010. (page [44](#)).
- [vdS06] Arjan van der Schaft. *Port-Hamiltonian systems: an introductory survey*. European Mathematical Society Publishing House (EMS Ph), 2006. (page [57](#)).

- [vdSJ14] Arjan van der Schaft and Dimitri Jeltsema. *Port-Hamiltonian Systems Theory: An Introductory Overview*. Now Publishers Incorporated, 2014. (pages [56](#), [57](#)).
- [WDLL05] Rong-Jong Wai, Rou-Yong Duan, Jeng-Dao Lee, and Li-Wei Liu. High-efficiency fuel-cell power inverter with soft-switching resonant technique. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 20(2):485–492, 2005. (page [36](#)).
- [WE05] Sheldon S Williamson and Ali Emadi. Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 54(3):856–862, 2005. (page [8](#)).
- [WE11] Sanjaka G Wirasingha and Ali Emadi. Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(1):111–122, 2011. (page [16](#)).
- [WLFL13] Haiying Wang, Yang Liu, Hang Fu, and Gechen Li. Estimation of state of charge of batteries for electric vehicles. *International Journal of Control and Automation*, 6(2):185–194, 2013. (page [30](#)).
- [www13] www.FuelCellToday.com. Water electrolysis & renewable energy systems. 2013. (page [2](#)).
- [XWW14] Liang Xian, Gucheng Wang, and Youyi Wang. Subproportion control of double input buck converter for fuel cell/battery hybrid power supply system. *Power Electronics, IET*, 7(8):2141–2150, 2014. (pages [2](#), [44](#)).
- [YLZ<sup>+</sup>15] Haitao Yun, Shude Liu, Yulan Zhao, Jianxin Xie, Chao Liu, Zhongjun Hou, and Keyong Wang. Energy management for fuel cell hybrid vehicles based on a stiffness coefficient model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40:633–641, 2015. (page [14](#)).
- [Zan10] Majid Zandi. *Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2010. (page [23](#)).

- [Zem07] Ali Zemouche. *Sur l'observation de l'état des systèmes dynamiques non linéaires*. PhD thesis, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2007. (pages [17](#), [18](#)).
- [Zer11] Mohamed Zerrougui. *Observation et commande des systemes singuliers non linéaires*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2011. (pages [16](#), [17](#), [18](#)).

ThesisHmy.ptc