UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT
DROIT D'AUTEUR

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document. Toute contrefaçon, plagiat ou reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
34 COURS LÉOPOLD — CS 25233
54052 NANCY CEDEX
TÉL : 03 54 50 54 00
CONTACT@UNIV-LORRAINE.FR
WWW.UNIV-LORRAINE.FR

Surveillance et gestion d'énergie d'un système multi-sources

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 05/12/2025
en vue de l'obtention du

DIPLÔME DE DOCTORAT

Mention : Automatique, traitement du signal, Génie Informatique

Par

Nassira BARHOUMI

Composition du jury:

M. Abderrahmen ZAAFOURI	Université de Tunis, Tunisie	Président
Mme Imen SAIDI	Université de Tunis el Manar, Tunisie	Rapporteuse
M. Tedjani MESBAHI	INSA de Strasbourg, France	Rapporteur
Mme Choubeila MAAOUI	Université de Lorraine, France	Examinatrice
M. Cherif LAROUCI	ESTACA, France	Examinateur
M. Faouzi BACHA	Université de Tunis Carthage, Tunisie	Co-Directeur de la thèse
M. Moussa BOUKHNIFER	Université de Lorraine, France	Directeur de la thèse

École doctorale IAEM Lorraine - Informatique, Automatique, Électronique - Électrotechnique, Mathématiques de Lorraine
LCOMS - Laboratoire de Conception, Optimisation et Modélisation des Systèmes (Metz)

dédicaces

À la mémoire de mon père, parti trop tôt, dont l'amour, les valeurs et l'exemple continuent d'éclairer chacun de mes pas.

À ma mère, pilier de ma vie, pour sa patience, ses sacrifices et sa confiance inébranlable, qui ont rendu ce parcours possible.

À mon mari, mon roc et mon partenaire de vie, pour l'amour calme, la compréhension et la présence réconfortante aux heures de doute.

À ma sœur et mes frères, pour le lien qui soutient, relève et rassemble.

À **ma famille au sens large**, et à **toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, m'ont tendu la main** — par un mot, un geste, un conseil ou un simple sourire — et ont rendu ce chemin plus lumineux. Puissiez-vous reconnaître ici la marque de ma gratitude.

À mes amis, pour les rires, l'élan et la fidélité qui allègent le poids des longues journées.

Cette thèse vous est dédiée, avec reconnaissance.

Remerciements

Je souhaite d'abord exprimer ma profonde gratitude à mes encadrants, **Pr. Moussa Boukhnifer** et **Pr. Faouzi Bacha**. Leur exigence scientifique, leur disponibilité et la confiance qu'ils m'ont accordée ont façonné ce travail. Leurs conseils précis, leur sens de la rigueur et leur bienveillance ont été décisifs à chaque étape de la thèse.

En plus de mes encadrants, je tiens à adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des membres du jury.

J'exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements à **Mme Imen Saidi**, et à **M. Tedjani Mesbahi**, pour avoir accepté la charge de *rapporteurs* de ces travaux de thèse. Je les remercie vivement pour le temps consacré à l'évaluation de ce manuscrit ainsi que pour la qualité et la pertinence de leurs remarques et suggestions, qui ont grandement contribué à l'enrichissement de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à à **Mme Choubeila Mouaoui**, en qualité d'*examinatrices*, ainsi qu'à **M. Chérif Larouci**, en qualité d'*examinateur*, pour l'intérêt porté à mes travaux et pour leurs questions et commentaires constructifs lors de la soutenance.

Je remercie chaleureusement l'Université de Lorraine (France), et l'Université de Tunis (Tunisie), pour l'accueil, l'accompagnement quotidien et un environnement de travail stimulant. Les discussions scientifiques, l'entraide, ainsi que l'accès aux plateformes et ressources expérimentales ont été déterminants pour la réussite de cette recherche.

Ma reconnaissance va également à mes professeur·e·s pour les bases solides qu'ils m'ont transmises et à toutes celles et ceux — au laboratoire comme à l'université — qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de cette thèse.

À toutes et à tous, merci pour votre confiance, votre exigence bienveillante et votre soutien.

Sommaire

Table de matières **vi**

Table de figures **ix**

Table de tableaux **x**

Acronymes et abréviations xi

Introduction générale **1**

I Etat de l'Art **7**

I.1 Introduction 8

I.2 Importance des systèmes hybrides pour la transition énergétique 8

I.2.1 Les véhicules hybrides et leurs architectures 10

I.2.2 Configuration série d'un Système Hybride 10

I.2.3 Configuration Parallèle d'un Système Hybride 11

I.2.4 Comparaison et hybridation combinée 11

I.2.5 Les véhicules électriques et leurs architectures 12

I.3 Sources d'énergie utilisées dans les véhicules électriques 17

I.3.1 Les Piles à combustible 17

I.3.2 Les supercondensateurs 18

I.3.3 Les batteries 19

I.3.4 Comparaison technologique 20

I.3.5 Focus sur les batteries lithium-ion 21

I.4 Enjeux technologiques liés à l'hybridation des sources d'énergie 21

I.4.1 Hétérogénéité des sources et nécessité de convertisseurs 21

I.4.2 Complexité de la gestion d'énergie multi-sources 22

I.4.3 Surveillance et diagnostic de l'état de santé de la batterie 22

I.5 Convertisseurs DC–DC dans un système multi-source 23

I.5.1 Convertisseur entrelacé flottant 4 phases 26

I.6 Méthodes de gestion d'énergie pour les VH et VE 27

I.7 Classification des stratégies de gestion d'énergie 27

I.8 Stratégies basées sur des règles déterministes 29

I.8.1 Stratégie à hystérésis (Thermostat) 29

I.8.2 Stratégie de suivi de puissance (Power Follower) 29

I.8.3 Stratégies déterministes et commande par machine d'états 30

I.8.4 Optimisation hors ligne (Global Optimization) 31

I.8.5 Optimisation en ligne (Instantaneous Optimization) 31

I.8.6 Limites et justification du non-choix dans cette thèse 31

I.9 Méthodes de gestion d'énergie basées sur l'intelligence artificielle 32

I.9.1 Limites et justification du non-choix de l'approche IA 32

I.10 Motivation du choix méthodologique dans cette thèse . . . 33
I.11 Surveillance de la batterie . . . 34
I.11.1 Motivation et principes généraux . . . 35
I.11.2 Observabilité des systèmes linéaires . . . 35
I.11.3 Observabilité des systèmes non linéaires . . . 36
I.11.4 Motivation du choix de l'observateur SMO . . . 37
I.12 Observateur en Mode Glissant : principe et application dans la supervision de batterie . . . 38
I.12.1 Principe général de l'observateur en mode glissant . . . 38
I.12.2 Phases de convergence de l'estimation . . . 38
I.12.3 Application à un modèle de batterie . . . 38
I.12.4 Conditions de glissement et convergence . . . 39
I.12.5 Avantages pour la supervision de batteries . . . 39
I.13 Défauts des batteries . . . 39
I.13.1 Anomalies de tension . . . 40
I.13.2 Défauts de courts-Circuits internes . . . 41
I.14 Conclusion . . . 42

II Modélisation du Système Hybride **43**
II.1 Introduction . . . 44
II.2 Structure du système hybride . . . 44
II.3 Modélisation des sources . . . 45
II.3.1 Modélisation de la pile à combustible PEMFC . . . 45
II.3.2 Modélisation de supercapacité . . . 48
II.3.3 Modélisation de la batterie . . . 50
II.4 Modélisation des convertisseurs DC/DC . . . 53
II.4.1 Principe de fonctionnement du convertisseur DC/DC unidirectionnel . . . 54
II.4.2 Principe de fonctionnement du convertisseur DC/DC Bidirectionelle . . . 63
II.4.3 Modélisation petit-signal du convertisseur flottant entrelacé à quatre phases 69
II.5 Commande des convertisseurs . . . 71
II.5.1 Régulation du courant des sources . . . 72
II.5.2 Régulation de la tension du bus continu . . . 73
II.6 Conclusion . . . 74

III Stratégies de gestion d'énergie et de diagnostic **75**
III.1 Introduction . . . 76
III.2 Système hybride à deux sources . . . 76
III.2.1 Architecture PAC/Supercondensateur . . . 77
III.2.2 Architecture PAC–Batterie . . . 87
III.3 Système hybride à trois sources . . . 94
III.3.1 Stratégie de gestion d'énergie . . . 94
III.3.2 Résultats de simulation . . . 100
III.3.3 Analyse comparative des stratégies de gestion énergétique et mise en valeur de l'hybridation tri-sources . . . 105
III.4 Surveillance du système . . . 106
III.5 Motivation et contexte . . . 107
III.6 Synthèse de l'observateur . . . 107
III.6.1 Observateur à mode glissant . . . 107

III.6.2 Définition de la surface de glissement . . . 108
III.7 Observateur par mode glissant pour la batterie . . . 108
III.7.1 Analyse de stabilité par Lyapunov . . . 109
III.8 Les défauts des batteries . . . 111
III.8.1 Méthodologie de diagnostic des défauts par observateur en mode glissant . 111
III.8.2 Effet de défaut capteur de tension sur l'état de charge . . . 114
III.8.3 Représentation d'état de la batterie avec défaut court circuit . . . 116
III.8.4 Synthèse de l'observateur SMO pour la détection de court-circuit interne . 118
III.8.5 Détection d'un défaut de court-circuit interne par observateur et méthode CUSUM . . . 119
III.9 Conclusion . . . 123

IV Validation Expérimentale **125**
IV.1 Introduction . . . 126
IV.2 Le systeme Hard In the Loop (HIL) . . . 126
IV.2.1 Description de la plateforme expérimentale . . . 128
IV.2.2 Architecture matérielle et environnement logiciel . . . 129
IV.2.3 Configuration HIL du système hybride . . . 132
IV.3 Démarche expérimentale de validation sous OPAL-RT . . . 134
IV.4 Validation expérimentale de la stratégie de gestion d'énergie et aperçu du dispositif de supervision . . . 136
IV.4.1 Création de l'interface Opal-Rt/Labview . . . 136
IV.4.2 Implantation HIL du système hybride sous RT-LAB . . . 138
IV.4.3 Scénario 1 : Système a deux sources (PAC/Supercapacité) . . . 139
IV.4.4 Scénario 2 : Système a deux sources (PAC/Batterie) . . . 141
IV.4.5 Scénario 3 : Système a trois sources (PAC/SC/Batterie) . . . 144
IV.5 Comparaison entre les architectures proposées . . . 146
IV.5.1 Analyse des résultats . . . 147
IV.6 Conclusion . . . 150

Références bibliographiques **154**

Liste des figures

Figure I.1 Typologie des véhicules hybrides selon la nature des sources énergétiques. 9
Figure I.2 Configuration série d'un Système Hybride 10
Figure I.3 Configuration Parallèle d'un Système Hybride 11
Figure I.4 Configuration d'une hybridation combinée série-parallèle 12
Figure I.5 Diagramme de Ragone. 14
Figure I.6 Véhicule électrique à trois sources. 15
Figure I.7 Pile à combustible. 17
Figure I.8 Schéma de principe d'un supercondensateur (EDLC). 19
Figure I.9 Structure interne d'un pack batterie. 20
Figure I.10 Topologies flottantes non isolées utilisées pour la comparaison. 25
Figure I.11 Schéma du convertisseur entrelacé flottant à quatre phases. 26
Figure I.12 Classification des stratégies de gestion d'énergie pour un véhicule électrique hybride. 28

Figure II.1 Structure du système hybride 44
Figure II.2 Modèle électrique équivalent de la pile à combustible PEMFC 46
Figure II.3 Caractéristique statique de la pile à combustible pour différentes pressions d'hydrogène 47
Figure II.4 Représentation schématique du supercondensateur basé sur le modèle de Thévenin d'ordre 1. 48
Figure II.5 Modèle de Thévenin 2e ordre d'une batterie. 50
Figure II.6 Convertisseur DC/DC entrelacé flottant à 4 phases. 55
Figure II.7 Signaux de commande déphasés des quatre interrupteurs du convertisseur entrelacé sur une période T_s 56
Figure II.8 Évolution temporelle des courants d'inductances, des courants de condensateurs et de la tension du bus dans un convertisseur entrelacé à 4 phases 56
Figure II.9 Convertisseur DC/DC entrelacé flottant à 4 phases dédié a la PAC. . . . 58
Figure II.10 Circuits équivalents du convertisseur DC/DC pour les 8 intervalles de fonctionnement 60
Figure II.11 Convertisseur DC/DC entrelacé flottant à 4 phases dédié a la Sc. 65
Figure II.12 Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant dédié a la batterie. . . . 67
Figure II.13 Régulation PI imbriquées courant tension 71
Figure II.14 Régulation des courants 73
Figure II.15 Régulation tension 73

Figure III.1 Architecture PAC–Supercapacité. 77
Figure III.2 Algorithme de la stratégie de gestion d'énergie pour le système hybride PAC–Sc. 79
Figure III.3 Profil de vitesse du cycle NEDC (New European Driving Cycle). 81
Figure III.4 Évolution temporelle des puissances *P-PAC*,*P-Sc*, *P-Ch* 82

Figure III.5 Évolution temporelle de l'état de charge de la supercapacité ($SOC - Sc$). 83
Figure III.6 Évolution temporelle des tensions d'entrée : ($V -$ Sc) et ($V -$ PAC). . . . 83
Figure III.7 Évolution du rapport cyclique de commande durant la simulation 84
Figure III.8 Courant inducteur d'une phase I_L et consigne I_{Lref} avec zoom sur un transitoire. 85
Figure III.9 Tensions aux bornes des capacités V_{c1} et V_{c2} comparées à la consigne V_{cref} (zoom inclus). 85
Figure III.10 Évolution de la tension du bus DC V_{bus} durant la simulation 86
Figure III.11 Architecture de la configuration PAC–Batterie 87
Figure III.12 Algorithme de la stratégie de gestion d'énergie pour le système hybride PAC–batterie 89
Figure III.13 Évolution des puissances échangées entre la PAC (P_{PAC}), la batterie (P_{Batt}) et la charge (P_{Ch}) au cours du cycle NEDC. 90
Figure III.14 Évolution de l'état de charge de la batterie (SOC) 91
Figure III.15 Évolution de la tension du bus DC V_{Bus} durant le cycle NEDC.. 91
Figure III.16 Rapport cyclique (duty cycle) du convertisseur PAC 92
Figure III.17 Évolution des tensions d'entrée de la PAC et de la batterie au cours de la simulation. 93
Figure III.18 Schéma d'architecture d'un système hybride multi-sources. 94
Figure III.19 Transition entre traction et régénération selon le signe de la puissance P_{ch}. 95
Figure III.20 Organigrammes de gestion d'énergie : (a) traction et (b) régénération. . . 95
Figure III.21 Tests de validation SOC pour la batterie et la supercapacité. 96
Figure III.22 Répartition des puissances entre PAC, supercapacité, batterie et charge . 100
Figure III.23 Évolution des tensions aux bornes de la supercapacité, de la pile à combustible et de la batterie dans l'architecture triplement hybride. 101
Figure III.24 Courants dans les trois sources hybrides (I_{SC}, I_{PAC}, I_{Bat}) 102
Figure III.25 Évolution du SOC de la batterie et de la supercapacité 103
Figure III.26 Évolution du rapport cyclique (duty cycle) appliqué aux convertisseurs . 104
Figure III.27 Tension du bus continu V_{bus} 104
Figure III.28 Architecture du diagnostic des défauts capteurs basé sur un observateur en mode glissant. 112
Figure III.29 Défaut capteur de tension simulé 114
Figure III.30 Estimation du SOC sous défaut de capteur de tension 115
Figure III.31 Impact d'une mesure de tension erronée sur l'estimation 115
Figure III.32 Batterie Thevenin 2nd ordre avec défaut court-circuit. 116
Figure III.33 Organigramme de détection de court-circuit interne basé sur l'observateur et la méthode CUSUM 119
Figure III.34 Courants de court-circuit : mesurés vs estimés selon R_{cc} 120
Figure III.35 Évolution du SOC estimé et mesuré pour différents niveaux de court-circuit interne 121
Figure III.36 Tensions aux bornes de la batterie : Sans défaut, estimée et mesurée pour différentes valeurs de R_{cc} 122
Figure III.37 Évolution de la variable de décision DS_N issue de la méthode CUSUM pour différentes valeurs de R_{cc} 123

Figure IV.1 Vue d'ensemble du matériel OPAL-RT 126
Figure IV.2 Matériel utilisé pour la validation expérimentale. 127
Figure IV.3 Vue détaillée de la plateforme OP4512. 129

Figure IV.4 Schéma global du système OP4512. 130
Figure IV.5 Configuration générale d'une plateforme HIL basée sur OPAL-RT avec gestion distante via une station hôte. 131
Figure IV.6 Organisation modulaire du modèle : interface graphique (SC_gui) et calcul temps réel (SM_computation) dans Simulink. 132
Figure IV.7 Schéma de l'interconnexion PC hôte / OPAL-RT via le protocole TCP/IP. 133
Figure IV.8 Opal labview interface FC/SC. 137
Figure IV.9 Architecture globale HIL du modèle dans RT-LAB 138
Figure IV.10 Implémentation du modèle physique SC dans RT-LAB : sources et convertisseurs 138
Figure IV.11 Sous-système de commande (SM) : stratégie de gestion d'énergie et régulation 139
Figure IV.12 Répartition expérimentale des puissances entre la PAC, le supercondensateur et la charge. 140
Figure IV.13 Formes d'ondes expérimentales : répartition de puissance entre la pile à combustible (PAC) et la batterie 142
Figure IV.14 Répartition expérimentale des puissances entre la PAC, la batterie, le supercondensateur et la charge sur banc OPAL-RT. 145

Liste des tableaux

Tableau I.1 Comparaison des performances des principales technologies de batteries. . . 21
Tableau I.2 Récapitulatif des structures de conversion DC–DC 24
Tableau I.3 Analyse comparative des principales stratégies de gestion d'énergie 33
Tableau I.4 Classification des défauts des batteries lithium-ion 40

Tableau II.1 Signaux de commande des interrupteurs sur un cycle T 57

Tableau III.1 Paramètres de simulation. 80
Tableau III.2 Tableau récapitulatif des processus de gestion selon les conditions de puissance et de SOC. 96
Tableau III.3 Répartition des puissances pour $P_{\text{ch}} < P_{\text{min}}$ 97
Tableau III.4 Répartition des puissances pour $P_{\text{min}} < P_{\text{ch}} < P_{\text{opt}}$ 98
Tableau III.5 Répartition des puissances pour $P_{\text{opt}} < P_{\text{ch}} < P_{\text{max}}$ 99
Tableau III.6 Répartition des puissances pour $P_{\text{ch}} > P_{\text{max}}$ 99

Tableau IV.1 Résumé des spécifications matérielles et logicielles du simulateur OP4512 . . 130
Tableau IV.2 Critères de comparaison des configurations hybrides FC/SC, FC/Batt et FC/SC/Batt 150

Abbreviations

AFC	Pile à combustible alcaline.
BMS	*Battery Management System* (système de gestion de batterie).
CAN	*Controller Area Network*.
CPU	Processeur central (Central Processing Unit).
DC/DC	Convertisseur continu–continu.
DMFC	*Direct Methanol Fuel Cell*.
EDL	*Electric Double Layer* (double couche électrique).
EDLC	*Electric Double-Layer Capacitor* (supercondensateur à double couche).
ECE-15	Segment urbain du cycle NEDC.
eFPGASIM	Package de simulation temps réel basé FPGA (OPAL-RT).
eMEGASIM	Package temps réel OPAL-RT pour conversion/réseaux.
ePHASORSIM	Package phasor temps réel OPAL-RT.
EMS	*Energy Management System* (stratégie/gestion d'énergie).
EUDC	*Extra-Urban Driving Cycle*.
FPGA	*Field-Programmable Gate Array*.
FIBDC	Convertisseur DC/DC bidirectionnel entrelacé flottant.
FTP-75	*Federal Test Procedure 75*.
GUI	*Graphical User Interface* (interface graphique).
HIL	*Hardware-in-the-Loop* (simulation temps réel).
HDMI	*High-Definition Multimedia Interface*.
HVDC	*High-Voltage Direct Current*.
HT-PEMFC	PEMFC haute température.
MCFC	*Molten Carbonate Fuel Cell*.
NEDC	*New European Driving Cycle*.
OPAL-RT	Plateforme/société de simulation temps réel.
OP4512	Châssis OPAL-RT 2U pour HIL.
PAFC	*Phosphoric Acid Fuel Cell*.
PAC	Pile à combustible.
PCIe	*Peripheral Component Interconnect Express*.
PEMFC	*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*.
PI	Régulateur proportionnel–intégral.
PWM	*Pulse-Width Modulation*.
RS232	Interface série RS-232.
RS422	Interface série RS-422.
RT-LAB	Environnement temps réel OPAL-RT.
RT-XSG	Boîte à outils de génération (Xilinx) OPAL-RT.
SC	Supercapacité / supercondensateur.
SFP	*Small Form-factor Pluggable*.
SOFC	*Solid Oxide Fuel Cell*.
SoC	*State of Charge* (état de charge).

SoH	*State of Health* (état de santé).
TCP/IP	*Transmission Control Protocol / Internet Protocol.*
USB	*Universal Serial Bus.*
VGA	*Video Graphics Array.*
WLTP	*Worldwide Harmonized Light-Duty Test Procedure.*

V_{PAC}	Tension de sortie de la pile à combustible.
I_{PAC}	Courant fourni par la pile à combustible.
V_{bat}	Tension aux bornes de la batterie.
I_{bat}	Courant de la batterie.
V_{SC}	Tension aux bornes de la supercapacité.
I_{SC}	Courant de la supercapacité.
SOC	État de charge de la batterie (0 à 1).
C_n	Capacité nominale de la batterie.
η	Rendement coulombique de la batterie.
V_{Bus}	Tension du bus continu (DC).
i_{L_i}	Courant dans l'inductance de la phase i du convertisseur.
D_i	Rapport cyclique de la phase i.
L	Inductance de chaque phase du convertisseur.
C	Capacité du filtre de sortie (bus DC).
R	Résistance équivalente de charge.
R_0	Résistance interne de la batterie.
$R_1,\ R_2$	Résistances des branches dynamiques (modèle de Thévenin).
$C_1,\ C_2$	Capacitances des branches dynamiques (modèle de Thévenin).
$V_{\text{RC1}},\ V_{\text{RC2}}$	Tensions des branches RC du modèle batterie.
$V_{\text{OC}}(\text{SOC})$	Tension à circuit ouvert de la batterie (fonction du SOC).
E_{Nernst}	Tension d'équilibre théorique de la PAC.
R_{int}	Résistance ohmique interne de la PAC.
$A,\ B$	Coefficients de pertes électrochimiques (modèle PAC).
I_0	Courant d'échange de la PAC.
I_{lim}	Courant limite de la PAC.
$K_{pi},\ K_{ii}$	Gains PI (boucle courant).
$K_{pv},\ K_{iv}$	Gains PI (boucle tension).
s	Variable de Laplace.
$\tilde{x}$	Perturbation (petit signal) d'une grandeur x.
$G(s)$	Fonction de transfert dans le domaine de Laplace.

Introduction Générale

L'évolution vers une transition énergétique durable repose sur le développement de nouvelles solutions de stockage et de méthodes de gestion d'énergie ajustées aux contraintes et aux objectifs croissants de performance, de fiabilité et de flexibilité. Les systèmes hybrides, combinant plusieurs sources d'énergie telles que les batteries, les supercondensateurs et les piles à combustible, offrent une réponse efficace aux exigences des applications modernes, notamment dans les secteurs du transport électrique, des micro-réseaux et des systèmes embarqués. Cependant, la gestion optimale de ces sources d'énergie hétérogènes représente un défi majeur en raison des dynamiques complexes et des contraintes spécifiques de chaque technologie.

Les batteries, en particulier, sont devenues une composante essentielle des systèmes énergétiques modernes. Leur utilisation s'étend des applications industrielles aux véhicules électriques et aux réseaux intelligents. Cependant, elles présentent des limitations en matière de vieillissement, de performances et de sécurité. L'association des batteries avec d'autres sources, telles que les supercondensateurs, permet d'optimiser leur exploitation en répartissant intelligemment les flux d'énergie. Cette hybridation nécessite toutefois des stratégies avancées de gestion d'énergie, impliquant des algorithmes de contrôle et des dispositifs de conversion de puissance performants.

L'intérêt pour la coordination optimale des flux énergétiques au sein des systèmes hybrides découle de la nécessité d'optimiser l'utilisation des ressources énergétiques tout en garantissant la stabilité et la fiabilité du système global. Plusieurs défis doivent être relevés, notamment l'amélioration de la durée de vie des batteries, la réduction des pertes énergétiques et la gestion dynamique des sources en fonction des conditions de charge et de demande.

Une mauvaise gestion des flux énergétiques peut entraîner une usure prématurée des batteries, des risques de surcharge ou de décharge profonde, ainsi qu'une baisse de l'efficacité globale du système. Il devient alors primordial de développer des stratégies intelligentes et robustes permettant une adaptation en temps réel aux conditions de fonctionnement.

La gestion efficace d'un système hybride implique plusieurs défis techniques et scientifiques. Parmi les principales difficultés rencontrées, l'optimisation de la répartition des flux énergétiques entre les différentes sources constitue un enjeu majeur. Cette répartition requiert des algorithmes avancés capables de prendre en compte les dynamiques spécifiques de chaque composant afin d'assurer une allocation optimale de l'énergie.

Un autre défi important réside dans la modélisation précise des comportements électrochimiques et dynamiques des batteries et des supercondensateurs. Cette modélisation est essentielle pour anticiper leur réponse aux différentes conditions de charge et de décharge, garantissant ainsi des performances stables et une exploitation en toute sécurité

L'intégration de convertisseurs de puissance adaptés représente également une problématique clé. Ces dispositifs doivent garantir un rendement énergétique optimal et permettre une ges-

tion fluide des transitions entre les différentes sources d'énergie, minimisant ainsi les pertes et maximisant l'efficacité globale du système.

Enfin, la robustesse et la fiabilité des algorithmes de gestion jouent un rôle crucial, en particulier en présence d'incertitudes et de perturbations externes. Une gestion efficace nécessite des stratégies capables d'adapter en temps réel les décisions de contrôle en fonction des variations des conditions de fonctionnement, assurant ainsi la stabilité et la performance du système hybride.

Les systèmes de stockage électrochimique, en particulier les batteries, sont confrontés à diverses contraintes physiques et chimiques susceptibles d'affecter leurs performances ainsi que leur durée de vie opérationnelle. Deux étapes critiques dans ce processus sont la charge et la décharge, dont la gestion conditionne directement l'état de santé des cellules.

Bien que la phase de charge soit généralement considérée comme moins agressive, une recharge mal contrôlée peut engendrer des phénomènes dommageables. Une tension excessive ou une charge prolongée est susceptible d'induire des élévations de température, ou encore de favoriser la formation de structures dendritiques dans les batteries lithium-ion, compromettant ainsi la stabilité interne et la sécurité du système.

Inversement, les cycles de décharge profonde, lorsqu'ils sont fréquents, exercent une contrainte significative sur les matériaux actifs des électrodes. Cette sollicitation excessive peut entraîner des déséquilibres électrochimiques internes, l'apparition de réactions secondaires et une réduction progressive de la capacité de stockage utile.

Ces déséquilibres successifs, qu'ils soient issus d'une surcharge ou d'une décharge excessive, accélèrent le vieillissement des cellules. À terme, cela se traduit par une dégradation fonctionnelle, une diminution de l'autonomie énergétique et une baisse de la fiabilité du dispositif de stockage. Pour cette raison, une stratégie de gestion intelligente et préventive est indispensable afin de préserver la durabilité, la sécurité et l'efficacité globale des batteries dans les applications exigeantes.

La fréquence des cycles influence également la durabilité des cellules. Plus une batterie subit de cycles complets, plus elle perd en capacité. C'est pourquoi les batteries vieillissent mieux lorsqu'elles sont utilisées avec des cycles partiels, par exemple en maintenant leur charge entre 20 % et 80 %. Par ailleurs, des courants de charge et de décharge excessifs peuvent générer un échauffement important, ce qui entraîne une dégradation accélérée des électrodes et de l'électrolyte, contribuant ainsi à une perte de capacité et à une augmentation de la résistance interne. Le maintien de la batterie dans des plages de température extrêmes, notamment au-delà de 40 °C ou en dessous de 0 °C, aggrave encore davantage ce phénomène.

Une mauvaise gestion des cycles de charge peut également engendrer des déséquilibres entre les cellules dans un pack batterie. Lorsque certaines cellules se chargent ou se déchargent plus rapidement que d'autres, des différences de tension apparaissent, ce qui peut conduire à une surcharge de certaines cellules et à une sous-charge d'autres. Ces déséquilibres affectent l'efficacité énergétique et accélèrent la détérioration des cellules les plus sollicitées. Pour pallier ces problèmes, les systèmes modernes intègrent un Battery Management System (BMS), qui régule la charge et la décharge, limite les courants excessifs, équilibre les cellules et protège ainsi la batterie contre une usure prématurée.

Les capteurs de tension occupent une fonction essentielle dans les systèmes de gestion des batteries, car ils conditionnent l'exactitude des informations relatives à l'état de charge (SoC) et à l'état de santé (SoH) des cellules. Lorsqu'un défaut affecte ces capteurs, les mesures collectées deviennent imprécises, voire erronées, ce qui compromet la fiabilité des décisions prises par le système de gestion d'énergie (BMS – Battery Management System). Une évaluation incorrecte de la tension peut fausser l'estimation de l'énergie disponible, induire une sollicitation inadaptée de la batterie et, à terme, engendrer un vieillissement prématuré, des performances dégradées,

voire des risques de fonctionnement critiques. La détection et la prise en compte proactive de ces défauts sont donc primordiales pour garantir la sûreté, la durabilité et l'efficacité du système de stockage.

L'un des problèmes majeurs liés aux capteurs de tension est le décalage de mesure (offset error), qui peut résulter d'une dérive des composants électroniques avec le temps, d'un bruit électromagnétique ou d'une calibration insuffisante. Une mesure erronée peut conduire à une sous-estimation ou à une surestimation du SoC, ce qui fausse la gestion des cycles de charge et de décharge. Par exemple, si le capteur indique une tension plus élevée qu'en réalité, le BMS pourrait arrêter la charge trop tôt, réduisant ainsi l'autonomie disponible. À l'inverse, une sous-estimation de la tension pourrait provoquer une surcharge, accélérant le vieillissement des cellules et augmentant le risque de surchauffe ou d'emballement thermique.

Un autre défaut fréquent est la non-linéarité des capteurs, qui entraîne des écarts de mesure non proportionnels à la vraie tension de la batterie. Ces erreurs sont particulièrement problématiques dans les batteries lithium-ion où la courbe de décharge est relativement plate sur une grande plage de SoC, rendant les erreurs de mesure difficiles à détecter. Par ailleurs, dans les systèmes de batteries multi-cellules, une défaillance d'un capteur individuel peut déséquilibrer la gestion du pack entier, conduisant à des écarts de tension entre les cellules et augmentant le stress sur les plus sollicitées.

Les courts-circuits internes des batteries sont des défauts graves pouvant entraîner des dysfonctionnements critiques, voire des risques d'incendie ou d'explosion. Ces anomalies, qui surviennent à l'intérieur même des cellules, sont souvent causées par des défauts de fabrication, le vieillissement des matériaux ou des conditions de fonctionnement extrêmes. Contrairement aux courts-circuits externes, qui résultent d'une jonction électrique immédiate entre les bornes opposées, les courts-circuits internes sont plus insidieux, car ils ne sont pas directement visibles et peuvent survenir de manière imprévisible.

L'une des principales causes des courts-circuits internes peuvent résulter de la croissance de dendrites de lithium au sein de la cellule. Dans les batteries lithium-ion, une surcharge ou une charge rapide excessive favorise la croissance de ces structures métalliques sur l'anode. Lorsque les dendrites atteignent le séparateur, une membrane isolante entre les électrodes, elles peuvent provoquer un contact direct entre l'anode et la cathode, déclenchant ainsi un court-circuit. Une autre cause fréquente est la dégradation du séparateur à mesure que les cycles de fonctionnement s'enchaînent. Une exposition prolongée à des températures élevées ou un vieillissement prématuré des matériaux peut fragiliser cette barrière essentielle, augmentant ainsi le risque d'un contact accidentel entre les électrodes.

Les impuretés et défauts de fabrication constituent également une source majeure de courts-circuits internes. La présence de particules métalliques résiduelles dans l'électrolyte ou les électrodes peut entraîner des points chauds et provoquer la perforation du séparateur. De plus, un mauvais alignement des couches de la cellule ou des défauts structurels peuvent favoriser une détérioration progressive menant à un court-circuit. Enfin, les chocs mécaniques, perforations et vibrations intenses subis par la batterie, notamment dans des applications comme les véhicules électriques ou les appareils mobiles, peuvent endommager le séparateur et déclencher un court-circuit interne.

Les conséquences d'un court-circuit interne sont souvent graves. Il entraîne une libération soudaine d'énergie, provoquant une montée en température rapide, pouvant conduire à un emballement thermique. Ce phénomène, où la chaleur générée par la réaction chimique s'auto-entretient, peut aboutir à un incendie ou à une explosion de la batterie. Pour limiter ces risques, des solutions comme l'intégration de capteurs thermiques, des fusibles internes et des systèmes avancés de gestion de batterie (BMS) permettent de détecter rapidement les anomalies et de cou-

per l'alimentation en cas de surchauffe. De plus, l'amélioration des matériaux du séparateur et l'utilisation d'électrolytes solides ou non inflammables sont des pistes prometteuses pour réduire la probabilité de courts-circuits internes.

Face à ces enjeux, il est essentiel de développer des méthodes avancées du suivi de l'évolution de la charge (SoC) et de l'état de dégradation (SoH) des systèmes de stockage, afin de prévenir les défaillances et d'améliorer la gestion de l'énergie stockée. L'état de charge (SoC) représente le niveau d'énergie restant dans la batterie par rapport à sa capacité totale, tandis que l'état de santé (SoH) reflète son niveau de dégradation et sa capacité à stocker et délivrer l'énergie de manière optimale au fil du temps. Une estimation précise de ces paramètres est cruciale pour garantir la sécurité, la fiabilité et la longévité des batteries utilisées dans des applications critiques comme les véhicules électriques, le stockage d'énergie renouvelable et l'électronique portable.

Enjeux Scientifiques et Avancées Proposées dans cette Thèse :

Cette thèse s'inscrit dans le contexte du développement d'une stratégie de gestion d'énergie d'un systèmes d'énergie hybrides visant à répondre aux exigences de performance, de fiabilité et de durabilité imposées par les applications électromobiles et stationnaires. Les travaux menés visent à apporter une double contribution scientifique et technique centrée autour de deux volets complémentaires : la gestion intelligente des flux d'énergie dans une architecture multi-sources, et le diagnostic avancé des batteries pour garantir la résilience du système face aux défauts internes et capteurs et aux défauts internes(cc).

La première contribution concerne la conception d'une solution algorithmique de répartition énergétique robuste et hiérarchisée pour un système hybride intégrant une pile à combustible, une batterie lithium-ion et une supercapacité. Cette stratégie repose sur des règles déterministes structurées de manière à exploiter les caractéristiques dynamiques de chaque source :

- La pile à combustible fournit la puissance moyenne autour de son point de fonctionnement optimal, limitant ainsi les pertes et assurant un fonctionnement efficace.
- La batterie prend en charge les variations prolongées de charge tout en restant dans une zone de fonctionnement favorable à sa longévité.
- La supercapacité intervient lors des transitoires rapides (accélérations, freinage régénératif), soulageant ainsi les autres sources.

Cette stratégie a été implémentée dans un système embarqué sous forme de règles simples, sans recourir à des algorithmes adaptatifs complexes, ce qui garantit une prise de décision rapide, prédictible et peu coûteuse en calcul. Le choix d'un convertisseur DC/DC entrelacé flottant à quatre phases permet de lisser les courants, de réduire les pertes de commutation, et de renforcer la tolérance aux défauts sur les branches, apportant ainsi une meilleure résilience matérielle au système.

L'efficacité de cette approche a été démontrée par des simulations sous MATLAB/Simulink, puis validée sur une plateforme temps réel OPAL-RT, ce qui a permis de confirmer la stabilité, l'équilibrage énergétique et la pertinence de l'approche.

La deuxième contribution de la thèse porte sur la conception d'un outil de diagnostic intelligent basé sur un observateur en mode glissant (Sliding Mode Observer – SMO) destiné à surveiller de la batterie et à détecter deux types de défauts critiques :

- Les erreurs de mesure des capteurs de tension,
- Les courts-circuits internes, dus notamment à la formation de dendrites ou à la dégradation des séparateurs.

L'objectif est de fournir une estimation précise de l'état de charge (SoC) et de santé (SoH), tout en identifiant les anomalies internes ou les dérives de capteurs susceptibles d'impacter les performances et la sécurité du système. L'observateur en mode glissant tire parti des équations dynamiques du modèle électrique de la batterie et introduit une loi de glissement garantissant la robustesse face aux incertitudes du système et aux perturbations externes.

Les contributions de cette thèse s'inscrivent dans une logique de renforcement de la résilience des systèmes hybrides. La combinaison d'une gestion d'énergie optimisée et d'un diagnostic embarqué robuste permet de garantir non seulement une meilleure efficacité énergétique, mais aussi une sûreté de fonctionnement accrue. Ces avancées ouvrent la voie à des systèmes hybrides intelligents, capables de s'adapter aux contraintes futures tout en offrant des garanties élevées en termes de longévité, de performance et de tolérance aux défauts.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres, chacun correspondant à une étape fondamentale du travail de recherche mené dans le cadre de cette thèse. L'ensemble du document retrace de manière structurée la démarche adoptée pour concevoir, modéliser, simuler et valider une solution algorithmique de répartition énergétique intelligente et robuste, adaptée à un système hybride multi-sources intégrant une pile à combustible, une batterie lithium-ion et une supercapacité.

- **Chapitre 1 – État de l'art** : Ce chapitre propose une revue approfondie des architectures hybrides et des techniques associées à la gestion d'énergie et au diagnostic des batteries. Une attention particulière est accordée aux approches existantes pour l'estimation de l'état de charge (SoC), à la détection des défauts internes, ainsi qu'aux stratégies de gestion énergétique multi-sources. Cette analyse critique permet de situer les travaux de cette thèse dans le contexte scientifique et technologique actuel, tout en mettant en évidence les défis non résolus.

- **Chapitre 2 – Modélisation du système hybride** : Cette partie est consacrée à la modélisation dynamique des composants principaux : pile à combustible, batterie lithium-ion, supercondensateur, et convertisseurs DC/DC entrelacés à quatre phases. Les équations d'évolution et les modèles électrochimiques sont formalisés de manière à constituer une base rigoureuse pour la conception des stratégies de commande. La modélisation intègre également les interactions énergétiques et les contraintes dynamiques spécifiques à chaque source.

- **Chapitre 3 – Stratégies de gestion d'énergie et de diagnostic** : Ce chapitre constitue le cœur de la contribution scientifique de cette thèse. Il présente la conception d'une solution algorithmique de répartition énergétique hiérarchisée basée sur des règles déterministes, répartissant les flux de puissance selon les capacités dynamiques de chaque source. Parallèlement, un observateur en mode glissant (Sliding Mode Observer – SMO) est développé pour estimer le SoC de la batterie tout en détectant les défauts critiques tels que les erreurs de capteurs de tension et les courts-circuits internes. L'approche proposée vise une gestion énergétique optimisée, robuste face aux incertitudes, tout en intégrant un outil de diagnostic embarqué.

- **Chapitre 4 – Validation temps réel sur plateforme OPAL-RT** : Le dernier chapitre présente l'implémentation pratique des stratégies de gestion d'énergie dans un environnement de simulation temps réel Hardware-in-the-Loop (HIL) basé sur la plateforme OPAL-RT. Les modèles développés sont traduits en code temps réel et intégrés dans une architecture de test permettant d'évaluer les performances sous des scénarios représenta-

tifs. Cette validation expérimentale met en évidence l'embarquabilité, stabilité, réactivité et précision des algorithmes proposés dans des conditions proches du déploiement réel.

Enfin, des conclusions sont tirées à l'issue de ces chapitres, mettant en évidence les principales contributions de ce travail, ainsi que les perspectives d'amélioration et les pistes de recherche susceptibles d'enrichir et de prolonger les résultats de cette thèse.

Les travaux de cette thèse ont donné lieu aux publications suivantes:

Publications dans des journaux indexés (Web of Science)

J1 **Nassira Barhoumi**, Hajer Marzougui, Moussa Boukhnifer, Faouzi Bacha, *Four-leg floating interleaved converters for electric vehicle applications with rule-based energy management algorithm*, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*.
Publié en ligne : Mai 2024.
doi.org/10.1177/01423312241243177

Communications dans des conférences internationales

C1 **Nassira Barhoumi**, Moussa Boukhnifer, Faouzi Bacha, *Resilient Energy Management Architecture of Hybrid Fuel Cell/Battery System*, *2025 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET 2025)*.
doi.org/10.1109/IC$_A$SET65966.2025.11231930

C2 **Nassira Barhoumi**, Hajer Marzougui, Faouzi Bacha, Moussa Boukhnifer, *Energy Management Algorithm of Fuel Cell/Supercapacitor System for Electrical Vehicle*, *2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*.
doi.org/10.1109/CoDIT55151.2022.9804117

C3 **Nassira Barhoumi**, Hajer Marzougui, Faouzi Bacha, *Improved Current Control of Floating Interleaved Boost Converter Dedicated to Vehicular Applications*, *2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*.
doi.org/10.1109/SCC53769.2021.9768391

Chapitre I

Etat de l'Art

Table de matières

I.1 Introduction 8
I.2 Importance des systèmes hybrides pour la transition énergétique. 8
I.2.1 Les véhicules hybrides et leurs architectures 10
I.2.2 Configuration série d'un Système Hybride 10
I.2.3 Configuration Parallèle d'un Système Hybride 11
I.2.4 Comparaison et hybridation combinée 11
I.2.5 Les véhicules électriques et leurs architectures 12
I.3 Sources d'énergie utilisées dans les véhicules électriques 17
I.3.1 Les Piles à combustible 17
I.3.2 Les supercondensateurs 18
I.3.3 Les batteries 19
I.3.4 Comparaison technologique 20
I.3.5 Focus sur les batteries lithium-ion 21
I.4 Enjeux technologiques liés à l'hybridation des sources d'énergie 21
I.4.1 Hétérogénéité des sources et nécessité de convertisseurs 21
I.4.2 Complexité de la gestion d'énergie multi-sources 22
I.4.3 Surveillance et diagnostic de l'état de santé de la batterie 22
I.5 Convertisseurs DC–DC dans un système multi-source 23
I.5.1 Convertisseur entrelacé flottant 4 phases 26
I.6 Méthodes de gestion d'énergie pour les VH et VE 27
I.7 Classification des stratégies de gestion d'énergie 27
I.8 Stratégies basées sur des règles déterministes 29
I.8.1 Stratégie à hystérésis (Thermostat) 29
I.8.2 Stratégie de suivi de puissance (Power Follower) 29
I.8.3 Stratégies déterministes et commande par machine d'états 30
I.8.4 Optimisation hors ligne (Global Optimization) 31
I.8.5 Optimisation en ligne (Instantaneous Optimization) 31
I.8.6 Limites et justification du non-choix dans cette thèse 31
I.9 Méthodes de gestion d'énergie basées sur l'intelligence artificielle. 32
I.9.1 Limites et justification du non-choix de l'approche IA 32

I.10 Motivation du choix méthodologique dans cette thèse 33
I.11 Surveillance de la batterie 34
I.11.1 Motivation et principes généraux 35
I.11.2 Observabilité des systèmes linéaires 35
I.11.3 Observabilité des systèmes non linéaires 36
I.11.4 Motivation du choix de l'observateur SMO 37
I.12 Observateur en Mode Glissant : principe et application dans la supervision de batterie 38
I.12.1 Principe général de l'observateur en mode glissant 38
I.12.2 Phases de convergence de l'estimation 38
I.12.3 Application à un modèle de batterie 38
I.12.4 Conditions de glissement et convergence 39
I.12.5 Avantages pour la supervision de batteries 39
I.13 Défauts des batteries 39
I.13.1 Anomalies de tension 40
I.13.2 Défauts de courts-Circuits internes 41
I.14 Conclusion 42

II Modélisation du Système Hybride 43

I.1 Introduction

Ce premier chapitre est consacré à l'état de l'art des systèmes hybrides, avec une attention particulière portée aux sources d'énergie utilisées, aux méthodes de gestion d'énergie et aux defauts liées aux batteries. Dans un premier temps, nous présenterons la motivation de cette étude, en mettant en évidence l'importance des systèmes d'énergies hybrides pour la transition énergétique. Ensuite, nous définirons les objectifs de la thèse avant d'explorer les différents concepts d'hybridation des systèmes énergétiques et leurs applications, notamment dans le domaine des véhicules hybrides et électriques.

Par la suite, nous passerons en revue les principales sources d'énergie utilisées, telles que la pile à combustible, la supercapacité et la batterie, en mettant l'accent sur leurs caractéristiques et leurs complémentarités. Nous nous intéresserons ensuite aux méthodes existantes de gestion d'énergie, qui permettent d'optimiser l'utilisation des ressources énergétiques et de garantir une performance optimale des systèmes hybrides.

Enfin, nous analyserons les observateurs utilisés pour estimer l'état de charge (SOC) des batteries, ainsi que les problématiques spécifiques aux batteries, notamment les défauts des capteurs de tension et les courts-circuits internes. La surveillance de ces défauts représente un enjeu majeur pour la fiabilité et la sécurité des systèmes énergétiques hybrides.

Ce chapitre se conclura par une synthèse des éléments étudiés et ouvrira la voie à la problématique spécifique abordée dans cette thèse.

I.2 Importance des systèmes hybrides pour la transition énergétique

Face aux défis environnementaux liés à l'utilisation massive des moteurs à combustion interne, tels que la pollution de l'air, l'augmentation des gaz à effet de serre, et la raréfaction des res-

sources fossiles, de nouvelles formes de mobilité ont émergé. Les véhicules hybrides constituent une réponse de transition pragmatique entre les technologies thermiques conventionnelles et la mobilité électrique pure. On distingue principalement deux grandes familles technologiques : les véhicules hybrides (VH) et les véhicules électriques (VE).

Les **VH** (aussi appelés *mild* ou *full hybrids*) intègrent un moteur thermique principal assisté par un moteur électrique secondaire, couplé à une batterie de capacité relativement limitée. Cette batterie assure principalement des fonctions d'assistance au démarrage, à l'accélération, ou de récupération d'énergie au freinage, sans possibilité de recharge externe. Ce type d'architecture est largement adopté dans les domaines de l'automobile et du transport ferroviaire en raison de son bon compromis entre complexité technique et gains énergétiques [1].

En revanche, les **VE** désignent une classe plus évoluée technologiquement, incluant les véhicules hybrides rechargeables (PHEV) et les véhicules à hybridation multi-sources. Les PHEV sont capables de fonctionner sur plusieurs dizaines de kilomètres en mode 100% électrique, avec possibilité de recharge sur le réseau. Les architectures multi-sources vont plus loin en intégrant plusieurs unités de stockage ou de génération (par exemple batteries lithium-ion, supercondensateurs, et piles à combustible), dans le but d'optimiser la fourniture d'énergie en fonction de la dynamique de la conduite.

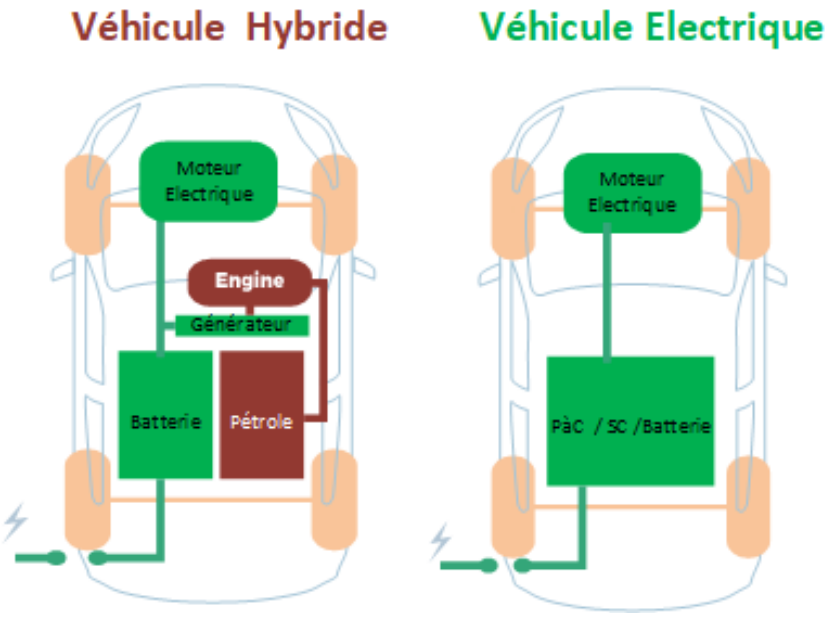


FIGURE I.1 : Typologie des véhicules hybrides selon la nature des sources énergétiques.

Ces véhicules électriques à sources multiples sont conçus pour combiner les avantages de chaque technologie. Les supercondensateurs assurent les pics de puissance instantanée, les batteries gèrent la moyenne énergétique, tandis que la pile à combustible joue un rôle de générateur d'appoint pour les longues distances. Cette complémentarité permet de prolonger l'autonomie, d'améliorer l'efficacité énergétique globale et de prolonger la durée de vie des composants [2].

Cette classification fonctionnelle des véhicules hybrides selon leur degré d'électrification et leur architecture énergétique permet d'identifier les compromis technologiques en jeu. Elle éclaire également les trajectoires d'innovation en matière de mobilité durable et d'optimisation énergétique dans le cadre de la transition énergétique mondiale.

I.2.1 Les véhicules hybrides et leurs architectures

Le véhicule hybrides combine un moteur thermique et un moteur électrique de puissance comparable. Le moteur électrique joue un rôle plus central, permettant une réduction de la taille du moteur thermique. L'augmentation de la capacité de la batterie permet une autonomie étendue en mode tout électrique, favorisant ainsi un fonctionnement sans émission, soit sous le contrôle du système de gestion électronique du véhicule, soit sous l'initiative directe du conducteur. Lorsque le mode électrique est géré automatiquement, il est généralement activé pour de courtes distances à faible vitesse, tandis que le moteur thermique prend le relais sur route ou en cas de circulation fluide. En revanche, si le conducteur a la possibilité de sélectionner le mode tout électrique, celui-ci peut être utilisé sur des distances plus longues, pouvant aller jusqu'à 20 km ou plus, ce qui le rend particulièrement adapté aux trajets urbains. Bien que la gestion d'un tel système soit techniquement complexe, elle permet d'optimiser l'efficacité énergétique du véhicule, entraînant ainsi une réduction de la consommation de carburant pouvant atteindre 40 à 45% [3].

L'un des principaux atouts des systèmes hybrides en traction réside dans la diversité de ses modes de fonctionnement, offrant une grande flexibilité dans la gestion énergétique.

Les véhicules hybrides (VH) peuvent être classés selon leur degré d'hybridation (micro, mild, full, plug-in) ainsi que selon l'architecture de leur groupe motopropulseur. Ce dernier critère est déterminant car il influence directement les performances énergétiques du véhicule, sa stratégie de gestion d'énergie, les émissions de gaz polluants, ainsi que l'autonomie en mode tout électrique.

Parmi les différentes topologies existantes, deux configurations fondamentales sont largement reconnues : l'architecture **série** et l'architecture **parallèle**. Leur choix dépend fortement du profil d'usage du véhicule, de ses contraintes mécaniques et énergétiques, ainsi que de la politique de commande embarquée.

I.2.2 Configuration série d'un Système Hybride

Dans une architecture série, le moteur thermique n'est pas connecté mécaniquement aux roues. Il entraîne un générateur électrique qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique. Celle-ci alimente ensuite un moteur électrique de traction, qui est le seul responsable de la propulsion. L'énergie excédentaire peut être utilisée pour recharger une batterie ou un supercondensateur, qui assurent un soutien transitoire en cas de demande de puissance élevée.

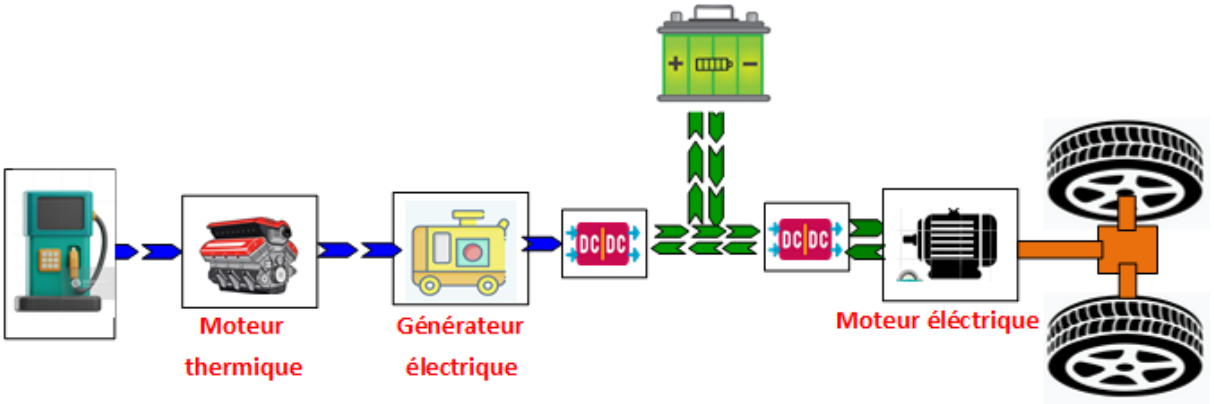


FIGURE I.2 : Configuration série d'un Système Hybride .

Cette architecture permet d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique en le maintenant dans sa plage de rendement maximal, indépendamment de la demande de traction. Elle est particulièrement adaptée aux environnements urbains à arrêts fréquents, où les vitesses sont

faibles et les phases d'accélération fréquentes. Toutefois, elle implique une double conversion d'énergie (thermique → électrique → mécanique), ce qui peut entraîner des pertes significatives à haute vitesse [4, 5].

I.2.3 Configuration Parallèle d'un Système Hybride

L'architecture hybride parallèle permet une connexion mécanique conjointe des sources de propulsion thermique et électrique vers le système de transmission, assurant ainsi une transmission de puissance combinée ou indépendante selon le mode de fonctionnement. La puissance peut être fournie par l'un ou l'autre, ou par les deux simultanément. La batterie est rechargée soit par récupération d'énergie au freinage (régénération), soit par le moteur thermique via un générateur. Cette configuration permet de choisir dynamiquement le meilleur partage de puissance entre les deux sources, en fonction de l'état de charge, du rendement des composants, et des conditions de conduite.

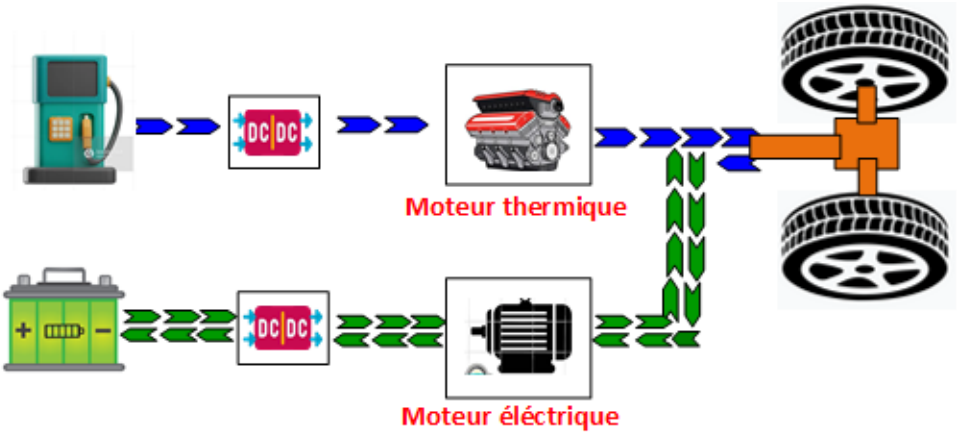


FIGURE I.3 : Configuration Parallèle d'un Système Hybride

L'architecture parallèle permet un fonctionnement très efficace lors des phases de croisière sur autoroute ou de montée soutenue, car elle évite les pertes dues aux conversions multiples. Toutefois, elle nécessite une coordination complexe entre les chaînes de propulsion thermique et électrique, ainsi qu'un dispositif de transmission sophistiqué [6].

I.2.4 Comparaison et hybridation combinée

Certaines configurations plus avancées combinent les deux architectures précédentes dans une structure dite *série-parallèle* ou *power-split*. Un système planétaire ou un embrayage intelligent permet de basculer dynamiquement entre les deux modes selon les conditions de roulage. Cette solution permet d'atteindre un niveau d'efficacité énergétique optimal dans un plus large spectre d'utilisation, mais au prix d'une complexité accrue de la transmission et du système de contrôle [7].

Les architectures série et parallèle présentent chacune des avantages spécifiques. Le choix optimal dépend des priorités de conception (consommation, compacité, coût, autonomie) et du profil d'usage (urbain, périurbain, longue distance). Les systèmes à architecture mixte ou power-split, combinant les deux approches, représentent un compromis de plus en plus populaire dans les véhicules hybrides de nouvelle génération.

Parmi les exemples représentatifs du marché, on peut citer :

La Toyota Prius (architecture power-split) qui utilise un train épicycloïdal pour répartir la puissance entre la traction électrique et le moteur thermique [Toyota, 2021].

Le Chevrolet Volt (première génération) qui fonctionne principalement en mode série avec un moteur thermique servant essentiellement de générateur [General Motors, 2013].

La Honda Accord Hybrid, qui utilise une architecture parallèle en vitesse de croisière et bascule en série à basse vitesse, illustrant bien le fonctionnement d'une hybridation combinée [Honda Motor Co., 2020].

Enfin, la Hyundai Ioniq Hybrid adopte une architecture parallèle optimisée pour la conduite périurbaine avec un moteur thermique et un moteur électrique couplés à une boîte DCT.

Ces véhicules démontrent l'évolution technologique et la diversité des stratégies adoptées pour améliorer le rendement énergétique et réduire les émissions de CO, tout en s'adaptant à différents profils d'usage.

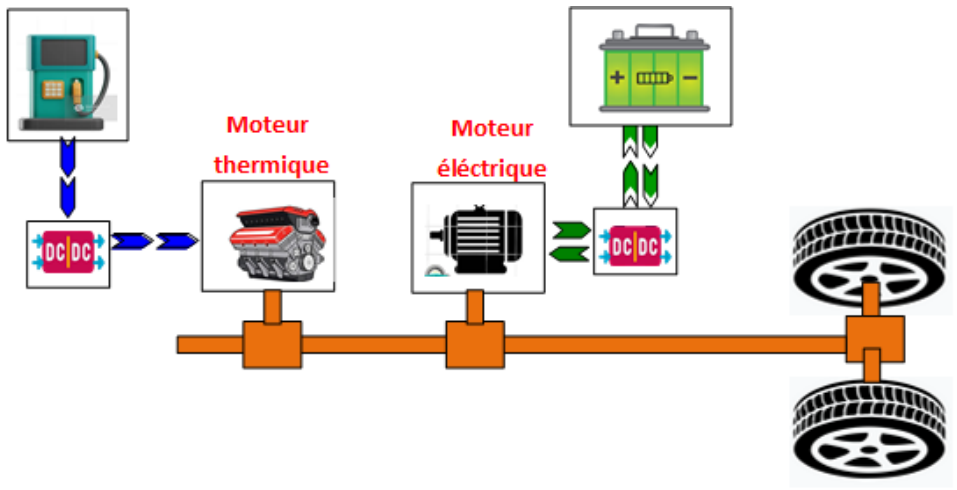


FIGURE I.4 : Configuration d'une hybridation combinée série-parallèle

Dans cette perspective, une optimisation de l'interaction entre les sources d'énergie et la consommation est essentielle pour améliorer l'efficacité énergétique globale du véhicule. À cet effet, la puissance totale requise est fournie par deux types de sources distinctes :
- Le moteur thermique, qui génère une énergie stable et continue, parfaitement adaptée aux besoins permanents,
- Le moteur électrique, qui répond aux demandes de puissance dynamique, grâce à une alimentation issue d'une batterie ou d'un supercondensateur.
Cette répartition intelligente de l'énergie permet d'optimiser le rendement du véhicule tout en réduisant son impact environnemental.

I.2.5 Les véhicules électriques et leurs architectures

Après l'essor des véhicules hybrides, qui associent moteur thermique et machine électrique afin de réduire la consommation de carburant et les émissions polluantes, une nouvelle génération est apparue : les véhicules électriques purs. Contrairement aux hybrides, où l'hybridation concerne la motorisation, l'architecture des véhicules électriques repose sur le système d'alimentation et de stockage d'énergie, tandis que la propulsion demeure entièrement électrique. Ainsi, la ou les sources d'énergie choisies déterminent directement la configuration adoptée.

Les premières générations de véhicules électriques ont été conçues autour d'une **source unique**, reposant sur une seule technologie de stockage ou de génération électrique. Trois grandes architectures sont recensées dans la littérature :

- **Le véhicule à batterie (Battery Electric Vehicle, BEV)**, aujourd'hui le plus répandu, qui bénéficie des avancées des batteries lithium-ion, offrant une densité énergétique élevée et une autonomie compétitive [8, 9].
- **Le véhicule à pile à combustible (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)**, utilisant l'hydrogène pour produire de l'électricité, caractérisé par une autonomie étendue et un ravitaillement rapide [10].
- **Le véhicule à supercondensateur seul**, beaucoup plus rare, étudié dans des applications spécifiques où une très forte densité de puissance et des cycles rapides charge/décharge sont requis [11].

Ces approches à source unique présentent toutefois des limites notables. Les BEV souffrent de temps de recharge longs et d'une puissance spécifique limitée, les FCEV répondent difficilement aux appels de puissance transitoires, tandis que les supercondensateurs ne garantissent pas une autonomie suffisante en raison de leur faible densité énergétique.

Pour pallier ces contraintes, une stratégie alternative consiste à associer plusieurs technologies de stockage et de génération. L'objectif est de combiner des sources complémentaires : l'une capable d'assurer l'autonomie grâce à sa forte capacité énergétique, et l'autre apte à fournir rapidement une puissance élevée lors des sollicitations transitoires.

C'est dans ce cadre que l'intégration d'une source secondaire devient particulièrement pertinente.

Dans un véhicule électrique à pile à combustible, l'ajout d'une source auxiliaire réversible en puissance, telle qu'un supercondensateur ou une batterie haute puissance, renforce la complémentarité des dispositifs. La pile à combustible fournit alors la puissance moyenne nécessaire au déplacement, tandis que la source secondaire prend en charge les variations rapides de charge : elle délivre l'énergie lors des phases de forte sollicitation (accélérations, reprises) et absorbe l'énergie cinétique lors du freinage.

Une telle architecture hybride présente plusieurs bénéfices majeurs :

- Elle **réduit le vieillissement prématuré de la pile à combustible** en la préservant des régimes transitoires,
- Elle **valorise l'énergie de freinage**, contribuant à diminuer la consommation d'hydrogène et à accroître l'autonomie,
- Elle **améliore le rendement global du système**, en maintenant la pile à combustible dans sa zone de fonctionnement optimale.

Le choix d'une source secondaire, et éventuellement d'une troisième technologie, repose sur deux paramètres essentiels :

- **La capacité de stockage**, qui conditionne l'autonomie du véhicule,
- **La réactivité en puissance**, qui garantit la réponse efficace aux sollicitations transitoires.

Ces considérations expliquent l'intérêt croissant pour les architectures **multi-sources**, où l'association de plusieurs technologies (batterie, supercondensateur, pile à combustible) permet de conjuguer leurs atouts respectifs tout en compensant leurs faiblesses. Cette approche ouvre la voie à des systèmes plus robustes, efficaces et adaptés aux exigences variées et évolutives de la mobilité électrique moderne.

Ces paramètres essentiels, à savoir la capacité de stockage et la réactivité en puissance, sont généralement illustrés par le diagramme de Ragone I.5. Ce dernier permet de comparer, de

manière synthétique, les performances des différentes technologies de stockage en fonction de leur densité énergétique et de leur densité de puissance.

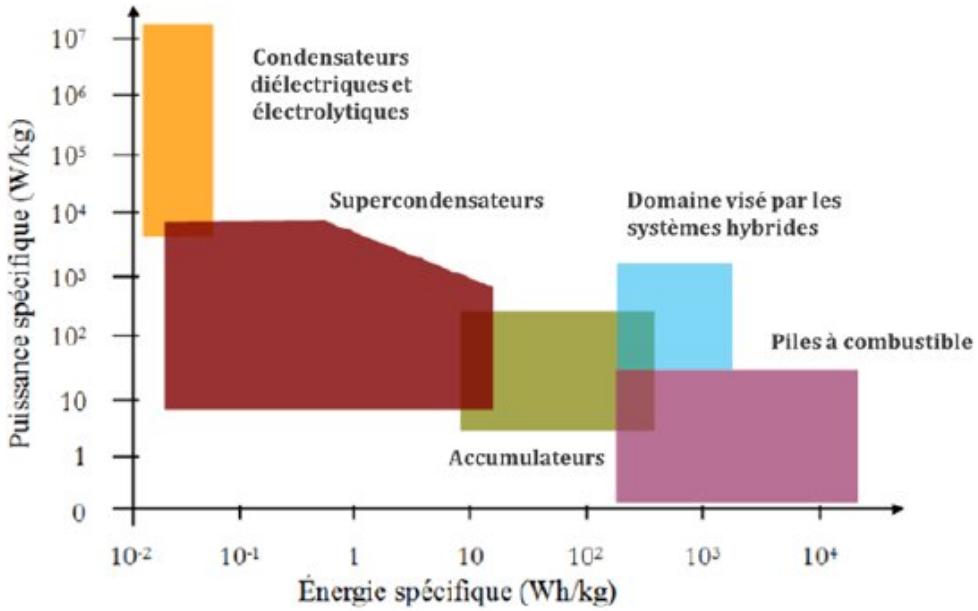


FIGURE I.5 : Diagramme de Ragone.

Dans de nombreux cas, il est nécessaire soit de surdimensionner le stockage, soit de limiter les performances en régime transitoire, ce qui impose des compromis en termes de volume et de masse.

Une approche plus efficace consiste à associer deux sources d'énergie complémentaires:

- Une source à haute densité énergétique, permettant un stockage optimisé sur le long terme.
- Une source à haute densité de puissance, capable de répondre aux variations rapides de demande.

En tenant compte des contraintes de densité d'énergie et de densité de puissance révélées par le diagramme de Ragone, l'hybridation s'impose comme une solution efficace pour constituer un système de stockage hybride équilibré plus efficace et mieux adapté aux exigences des applications énergétiques avancées.

L'évolution des architectures hybrides a suivi une dynamique de complexification croissante en réponse aux exigences accrues des profils de conduite et à la nécessité d'optimiser la gestion énergétique dans les véhicules électriques.
Initialement, de nombreuses recherches se sont focalisées sur l'association de deux sources : la pile à combustible (PAC) et la batterie. Cette configuration permettait déjà une complémentarité intéressante : la PAC assure l'alimentation en énergie continue tandis que la batterie couvre les phases transitoires modérées du cycle de conduite. Toutefois, cette architecture présente des limites lors de variations brusques de puissance, typiques en conduite urbaine ou lors de fortes accélérations. Selon Wu et al. [12], l'ajout d'un supercondensateur en complément de la pile à combustible permet de réduire efficacement les effets des régimes transitoires critiques, en améliorant la stabilité de la puissance fournie et la durabilité du système, notamment en cas de demande instantanée de puissance. Lorsqu'un appel de courant brutal survient, la pression de la cathode diminue, car l'oxygène réagit plus rapidement. Pour maintenir cette pression, le compresseur doit augmenter sa puissance, ce qui accentue la consommation électrique et aggrave le déséquilibre énergétique. En intégrant un SC en parallèle avec la PAC, il devient possible de

compenser cette surcharge transitoire, réduisant ainsi l'usure prématurée de la pile à combustible et prolongeant sa durée de vie.

L'étape suivante de cette évolution a été l'intégration des trois sources : **pile à combustible (PAC)**, **batterie** et **supercondensateur**. Les travaux de Thounthong *et al.* [13] ont été parmi les premiers à démontrer la pertinence d'une telle architecture hybride. Plus récemment, Marzougui *et al.* [14] ont approfondi cette approche en analysant le rôle dynamique de chaque source d'énergie au sein d'un véhicule électrique (VE) alimenté par une PAC.

Une analyse détaillée du courant fourni par chaque source durant un *cycle de conduite typique* montre que :

- La **pile à combustible (PAC)** constitue la source principale du système hybride. Grâce à sa forte densité énergétique et sa capacité à fonctionner durablement, elle alimente la charge de manière continue en couvrant la demande énergétique moyenne. Elle est particulièrement efficace lorsqu'elle opère dans une plage de puissance stable, généralement entre 50 et 70 % de sa valeur nominale, où son rendement est maximisé [15, 16]. Toutefois, sa lenteur de réponse face aux variations rapides de charge limite son usage pour les transitoires ; elle est donc souvent complétée par des sources secondaires.

- La **batterie lithium-ion** intervient en complément pour moduler les variations de puissance modérées, telles que les phases d'accélération ou de récupération d'énergie à intensité faible ou moyenne. Elle agit comme un tampon énergétique, maintenant l'équilibre entre production et consommation. Sa capacité bidirectionnelle lui permet également d'absorber l'énergie excédentaire ou de soutenir ponctuellement la charge [17].

- Le **supercondensateur** prend en charge les besoins énergétiques de très courte durée et à forte dynamique, notamment les démarrages soudains ou les freinages régénératifs violents. Caractérisé par une densité de puissance élevée, une réactivité instantanée (quelques millisecondes), et une excellente aptitude aux cycles répétés, il atténue les sollicitations brutales sur les autres composants, prolongeant ainsi leur durée de vie [18, 19]. Il joue ainsi un rôle de filtre dynamique dans la structure du système hybride.

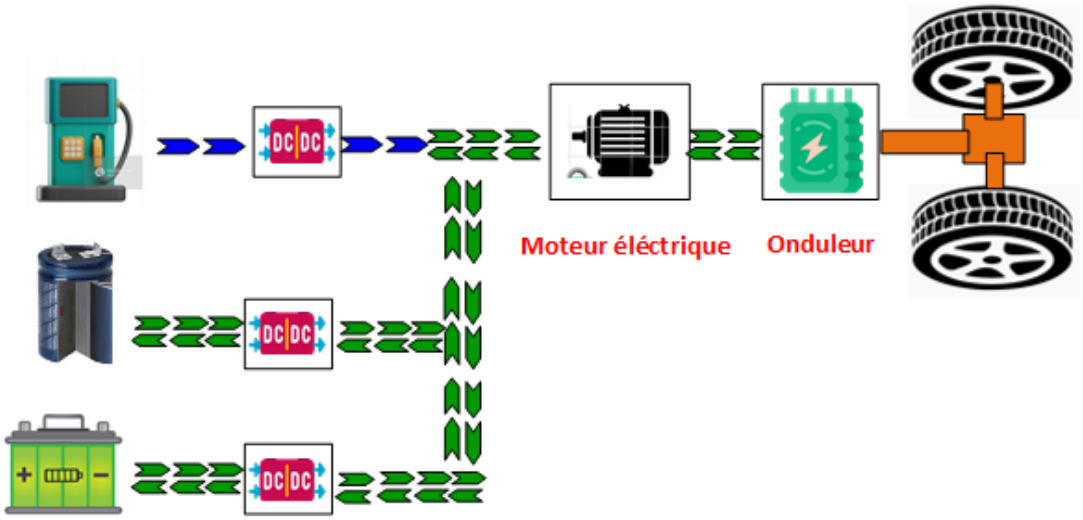


FIGURE I.6 : Véhicule électrique à trois sources.

L'architecture électrique intégrant une pile à combustible (PAC), une batterie lithium-ion et une supercapacité constitue une solution énergétique avancée. Elle permet une gestion optimale

de la puissance et de l'énergie, tout en tenant compte des caractéristiques dynamiques et des contraintes de vieillissement des différentes sources. Cette *hybridation avancée* permet :

- **Réduction des sollicitations dynamiques sur les composants sensibles** : L'ajout d'un dispositif de stockage à réponse rapide (comme la supercapacité) permet d'absorber les pics de puissance instantanés, soulageant ainsi la batterie et la PAC des transitoires rapides. Cela réduit l'amplitude des courants de charge/décharge et diminue leur stress électrochimique [15].

- **Limitation du vieillissement prématuré des sources électrochimiques** : Le fonctionnement de la PAC à puissance quasi constante, combiné à une réduction des cycles profonds de la batterie, améliore la durabilité globale du système. Des études montrent qu'une gestion efficace des transitoires permet de prolonger la durée de vie de plus de 30 % pour la batterie et jusqu'à 40 % pour la PAC [20, 21].

- **Optimisation globale de la gestion énergétique** : Une répartition intelligente de la demande entre les sources permet de minimiser la consommation d'hydrogène, d'améliorer l'efficience énergétique, et de réduire les pertes internes. Cette approche hiérarchisée multi-source est aujourd'hui considérée comme l'une des plus efficaces pour les véhicules hybrides [22].

- **Adaptabilité aux différents profils de conduite** : L'un des atouts majeurs des systèmes hybrides multi-sources réside dans leur capacité à s'ajuster dynamiquement aux conditions variables de conduite, en mobilisant de manière intelligente les ressources disponibles selon leur nature énergétique et leurs performances dynamiques.

  - *Conduite urbaine (stop-and-go)* : les supercapacités, caractérisées par leur densité de puissance élevée et leur aptitude à encaisser rapidement les charges/décharges, sont privilégiées pour gérer les accélérations et freinages fréquents. Cela permet de soulager la batterie et de récupérer efficacement l'énergie de freinage [18].
  - *Conduite stabilisée (autoroute)* : dans les phases de régime quasi constant, la pile à combustible opère à un point de fonctionnement proche de son rendement optimal. Elle devient ainsi la source principale, assurant une alimentation continue et stable de la charge tout en rechargeant éventuellement la batterie si nécessaire [22, 15].
  - *Conduite mixte (NEDC, WLTP)* : les trois sources interagissent de manière complémentaire. Des stratégies de gestion énergétique telles que la stratégie de minimisation de la consommation équivalente (ECMS), la programmation dynamique ou des approches basées sur l'apprentissage (reinforcement learning, fuzzy logic) assurent une répartition optimisée de la puissance à chaque instant [23, 24, 25, 26].

  Cette adaptabilité contextuelle garantit non seulement une performance énergétique robuste sur des profils de conduite variés, mais contribue également à la préservation de la durée de vie des composants, en évitant les sollicitations inutiles ou excessives [27, 28].

Ainsi, l'architecture **PAC–batterie–supercondensateur** constitue aujourd'hui une *référence technologique* pour les systèmes embarqués haute performance, conciliant robustesse, durabilité et efficacité énergétique, comme le confirment plusieurs études expérimentales et en temps réel [14].

I.3 Sources d'énergie utilisées dans les véhicules électriques

Les performances et la durabilité d'un véhicule électrique hybride reposent en grande partie sur la nature et la complémentarité des sources d'énergie qui le composent. Dans le cadre de l'architecture étudiée, trois technologies principales sont retenues : la pile à combustible, la batterie lithium-ion et la supercapacité.

I.3.1 Les Piles à combustible

Les **piles à combustible** sont des dispositifs électrochimiques qui assurent la conversion directe de l'énergie chimique, généralement provenant de l'hydrogène, en électricité. Ce processus, reposant sur une réaction d'oxydoréduction, ne génère comme sous-produits que de la chaleur et de l'eau, en faisant une technologie propre et silencieuse adaptée aux applications durables **Figure I.7**. [29, 30]. Leur fonctionnement repose sur une réaction d'oxydoréduction entre un agent réducteur (hydrogène) et un oxydant (oxygène de l'air), à travers un électrolyte permettant le transport des ions. Cette conversion s'effectue sans combustion, ce qui confère aux piles à combustible un rendement élevé et une faible empreinte environnementale.

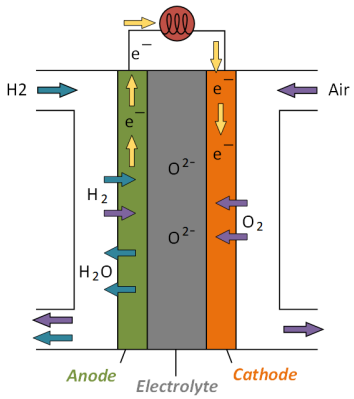


FIGURE I.7 : Pile à combustible.

Les premières découvertes fondamentales sur l'interaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène remontent au XIXe siècle [31, 32]. Ces travaux ont jeté les bases du développement des piles à combustible modernes. Le concept a été progressivement perfectionné au fil des décennies, notamment avec le développement des piles alcalines (AFC), largement utilisées dans les missions spatiales de la NASA, et plus récemment avec l'adoption des PEMFC dans le transport et l'énergie stationnaire [33, 34].

La figure I.7 montre la composition de chaque cellule unitaires empilées pour former un *stack*. Chaque cellule comprend :

- un électrolyte (liquide, solide ou polymère),
- une anode (électrode négative), où se produit l'oxydation de l'hydrogène,
- une cathode (électrode positive), où l'oxygène est réduit pour former de l'eau [35].

On peut classées les piles à combustible selon la nature de leur électrolyte et leur température de fonctionnement :

- **PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) : Fonctionne à basse température ($<$ 100°C) avec un électrolyte polymère acide et des électrodes au platine. Principalement utilisée dans l'automobile [36].

- **HT-PEMFC** : Version haute température (jusqu'à 200°C) des PEMFC avec électrolyte à base d'acide phosphorique [37].

- **DMFC** (Direct Methanol Fuel Cell) : Utilise du méthanol liquide comme carburant direct à travers une membrane polymère [38].

- **MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell) : Fonctionne à environ 650°C avec des sels carbonatés fondus comme électrolyte [39].

- **PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell) : Opère autour de 200°C avec de l'acide phosphorique comme électrolyte [40].

- **SOFC** (Solid Oxide Fuel Cell) : Fonctionne à très haute température (700–1000°C) avec un électrolyte céramique solide. Offre un haut rendement et une grande flexibilité sur le type de carburant [41].

- **AFC** (Alkaline Fuel Cell) : Fonctionne avec un électrolyte alcalin et des gaz purs (H_2, O_2). Très utilisée dans l'aérospatiale [42].

Les piles à combustible sont aujourd'hui déployées dans des applications variées :

- **Production d'électricité stationnaire** : pour bâtiments, data centers et sites industriels,

- **Transport** : intégrées dans les véhicules à hydrogène (bus, voitures, trains),

- **Aéronautique et spatial** : systèmes autonomes, satellites, équipements militaires [43].

Avec l'amélioration continue des matériaux et procédés, leur efficacité, leur durée de vie et leur rentabilité économique augmentent. Dans un contexte de transition énergétique, elles représentent une alternative prometteuse aux énergies fossiles [44].

I.3.2 Les supercondensateurs

Les **supercondensateurs (SCs)** constituent une technologie de stockage d'énergie intermédiaire entre les condensateurs classiques et les batteries électrochimiques. Leur développement a véritablement émergé dans les années 1960, lorsque General Electric a déposé les premiers brevets sur les condensateurs à double couche, suivis par la commercialisation dans les années 1970 par l'entreprise japonaise NEC. Depuis les travaux fondateurs de Conway [45], ils connaissent un essor continu grâce à leurs propriétés uniques de haute puissance spécifique et de longévité exceptionnelle.

Contrairement aux condensateurs électrostatiques conventionnels, les SCs ne reposent pas uniquement sur un diélectrique solide, mais exploitent la formation d'une *double couche électrique* (EDL) à l'interface entre une électrode poreuse et un électrolyte. Ils se distinguent par leur capacité à se charger et se décharger en quelques secondes, leur rendement énergétique élevé et une durée de vie pouvant dépasser le million de cycles [46]. Toutefois, ils présentent également des limitations, notamment une densité énergétique plus faible que celle des batteries et un phénomène d'auto-décharge plus prononcé [**electrolyte_performance**].

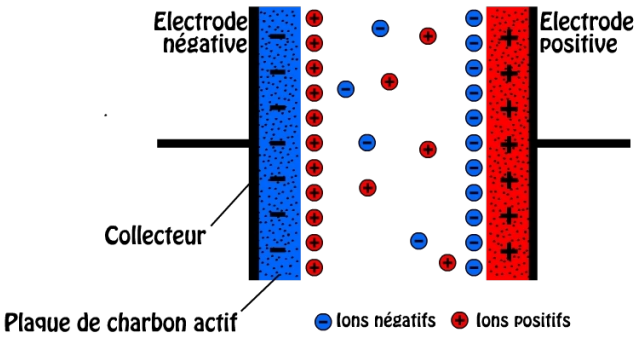


FIGURE I.8 : Schéma de principe d'un supercondensateur (EDLC).

Les supercondensateurs peuvent être classés en trois grandes familles : les EDLC, qui reposent sur un stockage électrostatique avec des électrodes en carbone poreux ; les pseudo-condensateurs, basés sur des réactions redox rapides à la surface des électrodes en oxydes métalliques ou polymères conducteurs ; et enfin les hybrides, qui combinent les deux mécanismes afin d'augmenter la densité énergétique tout en conservant une puissance élevée. Comme illustré dans **la Figure I.8**, un supercondensateur de type EDLC est constitué de deux électrodes en carbone poreux séparées par un électrolyte ionique. Lorsqu'une tension est appliquée, les ions positifs et négatifs se déplacent dans l'électrolyte et s'accumulent respectivement à la surface des électrodes de polarité opposée, formant deux couches de charges. Celles-ci sont séparées par une très fine couche diélectrique de solvant, constituant la double couche électrique. Ce mécanisme, purement électrostatique, explique à la fois la rapidité de charge/décharge et la grande robustesse cyclique des SCs, contrairement aux batteries où l'énergie est stockée par des réactions chimiques en volume.

Grâce à leurs caractéristiques, les SCs trouvent de nombreuses applications, allant du lissage de tension dans les alimentations et des systèmes de secours, jusqu'à la récupération d'énergie par freinage régénératif. Dans le domaine des transports, ils sont particulièrement adaptés pour absorber les pointes de puissance lors des phases de démarrage ou d'accélération, soulager les batteries et prolonger la durée de vie globale des systèmes de stockage embarqués.

En définitive, les supercondensateurs représentent une brique technologique incontournable dans les systèmes énergétiques modernes. Leur intégration en association avec des batteries ou des piles à combustible permet d'exploiter leurs performances uniques tout en compensant leurs limitations intrinsèques, en particulier dans le cadre des véhicules électriques.

I.3.3 Les batteries

Les **batteries** sont des dispositifs de stockage d'énergie constitués d'une ou plusieurs cellules électrochimiques capables de transformer directement l'énergie chimique en électricité grâce à des réactions d'oxydo-réduction entre un combustible et un oxydant. Chaque cellule comprend une anode, une cathode, un électrolyte assurant le transport ionique et un séparateur empêchant le court-circuit direct entre les électrodes. L'ensemble de ces éléments permet de générer une tension typique de l'ordre de 2 volts par cellule.

Dans les applications embarquées, les cellules sont regroupées en modules, puis intégrées dans des packs batteries. Ceux-ci sont généralement équipés d'un système de gestion électronique appelé *Battery Management System* (BMS). Le rôle du BMS est crucial : il assure l'équilibrage des cellules, régule les cycles de charge et de décharge, surveille la température et protège l'ensemble contre les conditions de fonctionnement critiques. Ces fonctions contribuent directement à la sécurité, à la fiabilité et à la longévité du système de stockage [47].

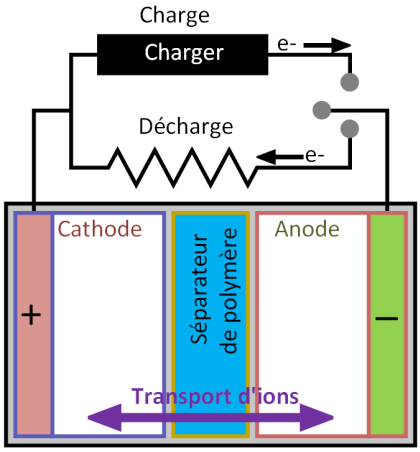


FIGURE I.9 : Structure interne d'un pack batterie.

La Figure I.9 illustre la structure interne d'un pack batterie typique, où l'on distingue l'assemblage hiérarchique des cellules en modules, puis en blocs, le tout piloté par une électronique de gestion. Cette organisation permet d'adapter les batteries aux besoins en énergie et en puissance des systèmes embarqués tout en garantissant une surveillance fine de leur fonctionnement.

Le choix d'une technologie de batterie repose sur plusieurs critères déterminants : la capacité nominale (Ah), l'énergie stockée (Wh), la densité énergétique massique (Wh/kg), la puissance spécifique (W/kg), la durée de vie exprimée en nombre de cycles et l'état de charge (*State of Charge*, SOC). Ce dernier, exprimé en pourcentage de la capacité disponible, constitue un indicateur essentiel pour le pilotage, la sécurité et l'optimisation du système énergétique [48].

Les différentes technologies utilisées dans les transports électriques se distinguent principalement par la chimie de leurs électrodes. Les batteries au plomb-acide, bien que peu coûteuses et recyclables, présentent une densité énergétique limitée (30–50 Wh/kg) et un nombre de cycles restreint, ce qui explique leur usage marginal dans la mobilité électrique moderne [49]. Les batteries Nickel-Métal-Hydrure (NiMH), popularisées par les premiers véhicules hybrides comme la Toyota Prius, offrent une densité énergétique modérée (60–120 Wh/kg) et une bonne robustesse thermique, mais souffrent d'un effet mémoire et d'une auto-décharge élevée, freinant leur adoption actuelle [50, 47]. Enfin, les batteries lithium-ion (Li-ion) dominent aujourd'hui les véhicules électriques et hybrides grâce à leur densité énergétique élevée (jusqu'à 265 Wh/kg), leur faible auto-décharge et leur longue durée de vie. Plusieurs variantes existent (NMC, LFP, NCA, LCO), chacune présentant des compromis entre coût, sécurité et performances [51, 49].

La sélection d'une technologie de batterie dépend donc fortement du profil d'application : autonomie visée, contraintes économiques, exigences thermiques et durée de vie souhaitée. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration continue des performances des batteries Li-ion et sur l'émergence de technologies post-lithium, telles que les batteries à électrolyte solide ou sodium-ion, qui pourraient répondre aux besoins croissants de la mobilité électrique tout en renforçant la durabilité [52].

I.3.4 Comparaison technologique

Les avancées récentes en matière de chimie des matériaux et de contrôle thermique ont considérablement renforcé la sécurité, la fiabilité et la durée de vie des batteries lithium-ion. Ces améliorations technologiques ont contribué à rendre l'autonomie des véhicules électriques de plus en plus compétitive, notamment dans les contextes urbains où les cycles d'utilisation sont courts et fréquents. Le tableau I.1 présente une synthèse comparative des principales technologies de

batteries utilisées dans les applications mobiles et stationnaires [49].

Tableau I.1: Comparaison des performances des principales technologies de batteries.

Type de batterie	**Énergie spécifique (Wh/kg)**	**Rendement énergétique**
Plomb–acide	30–50	70–85%
Nickel–métal–hydrure (NiMH)	60–120	70–90%
Lithium–ion (Li-ion)	150–250	95–98%

Avec la montée en puissance de la mobilité durable, les batteries jouent un rôle central dans les systèmes de stockage d'énergie embarqués. Leur choix, leur intégration et leur gestion conditionnent directement les performances globales des véhicules hybrides et électriques. Les batteries lithium-ion, en particulier, apparaissent comme une solution mature et évolutive, adaptée aux exigences croissantes du transport moderne.

I.3.5 Focus sur les batteries lithium-ion

Les accumulateurs lithium-ion sont aujourd'hui les plus utilisés dans les véhicules électrifiés en raison de leur haute densité énergétique, de leur faible masse et de leur efficacité. Ils offrent un rendement élevé (jusqu'à 98%) et une capacité à supporter des cycles rapides sans perte significative de performance. En outre, ils ne contiennent pas de métaux lourds toxiques tels que le plomb ou le cadmium, ce qui constitue un avantage environnemental notable [53].

Par ailleurs, plusieurs travaux ont été consacrés à la modélisation dynamique des batteries lithium-ion afin d'en prédire plus précisément le comportement sous diverses sollicitations. En particulier, l'étude de *Mesbahi et al.* [54] propose une approche fondée sur un algorithme d'optimisation hybride (PSO–NM), permettant une identification fine des paramètres et une meilleure estimation de leur réponse électrique en conditions dynamiques.

Cependant, leur fabrication demeure coûteuse, en partie en raison des matériaux actifs utilisés et de la complexité des procédés de production. Les batteries lithium-polymère, une variante de cette technologie, se distinguent par leur flexibilité mécanique et leur forme adaptable, mais présentent une conductivité ionique plus faible, limitant leur densité de puissance [50].

I.4 Enjeux technologiques liés à l'hybridation des sources d'énergie

L'hybridation énergétique consiste à combiner plusieurs sources d'énergie complémentaires telles que la pile à combustible (PAC), la batterie lithium-ion et la supercapacité. Cette combinaison vise à répondre aux exigences de puissance instantanée, d'autonomie et de rendement global dans des applications embarquées telles que les véhicules électriques (VE). Cependant, cette association soulève plusieurs défis technologiques majeurs qui imposent une architecture matérielle et logicielle adaptée.

I.4.1 Hétérogénéité des sources et nécessité de convertisseurs

Les trois sources présentent des caractéristiques dynamiques très différentes : la PAC fournit une puissance moyenne avec une inertie thermique élevée, la batterie offre une capacité énergétique significative avec un temps de réponse modéré, et la supercapacité est capable de répondre instantanément à des transitoires rapides mais avec une autonomie énergétique limitée. Cette

hétérogénéité impose l'utilisation de **convertisseurs DC/DC distincts pour chaque source**, adaptés à leurs plages de tension, leurs directions de flux d'énergie (mono ou bidirectionnels), et leurs contraintes de rendement.

Dans ce contexte, les convertisseurs bidirectionnels sont nécessaires pour la batterie et la supercapacité, permettant la charge et la décharge contrôlées, tandis qu'un convertisseur unidirectionnel élévateur est suffisant pour la pile à combustible. Ces convertisseurs doivent également intégrer des fonctions de filtrage, de protection et de découplage galvanique [55, 56].

I.4.2 Complexité de la gestion d'énergie multi-sources

L'introduction de plusieurs sources implique la conception d'une **stratégie de gestion d'énergie (EMS)** capable de répartir la puissance entre les sources de manière optimale, en fonction de l'état de charge, de la demande de puissance, de la température et des conditions de conduite. Cette gestion peut s'appuyer sur des règles déterministes, des algorithmes d'optimisation ou encore des approches d'apprentissage automatique [57].

La coordination efficace de ces sources permet de prolonger la durée de vie des composants électrochimiques, de réduire la consommation d'hydrogène et d'optimiser la récupération d'énergie lors des phases de freinage. La mise en œuvre temps réel de cette stratégie est cruciale pour garantir la fiabilité du système dans toutes les conditions d'utilisation [58, 59].

I.4.3 Surveillance et diagnostic de l'état de santé de la batterie

Parmi les sources d'énergie, la batterie est l'élément le plus sensible aux conditions de fonctionnement extrêmes, telles que la surintensité, les températures élevées ou les cycles de décharge profonds. Ces facteurs peuvent accélérer le vieillissement, altérer la capacité de stockage, et conduire à des défaillances internes graves.

Il est donc impératif de mettre en œuvre un **observateur embarqué** capable d'estimer en temps réel des grandeurs internes non mesurables telles que l'*état de charge* (State of Charge, SoC), l'*état de santé* (State of Health, SoH), ainsi que les paramètres internes comme la résistance série équivalente ou la capacité de la cellule. De plus, une telle approche permet la **détection précoce de défauts** critiques tels que les courts-circuits internes ou les dérives de capteurs, afin d'améliorer la sécurité et la durabilité des systèmes de stockage embarqués [60].

Des techniques telles que l'observation en mode glissant, les filtres de Kalman étendus ou les modèles à base de réseaux de neurones sont actuellement utilisées pour améliorer la précision de l'estimation et anticiper les défaillances [61, 62]. Cette surveillance conditionnelle est essentielle pour adapter dynamiquement la stratégie de gestion d'énergie, en tenant compte du vieillissement progressif de la batterie.

Ainsi, les enjeux technologiques liés à l'hybridation imposent une architecture intégrant trois éléments clés :

- Un **convertisseur DC/DC spécifique à chaque source**, assurant l'adaptation et le contrôle de la puissance ;
- Une **stratégie de gestion d'énergie optimisée**, répartissant intelligemment les flux d'énergie entre les sources ;
- Un **observateur embarqué pour la batterie**, garantissant une estimation fiable de son état de charge et de santé.

Ces éléments sont indispensables pour assurer la performance, la fiabilité et la durabilité d'un système hybride multi-sources dans des conditions réelles de fonctionnement.

I.5 Convertisseurs DC–DC dans un système multi-source

Les progrès récents des semi-conducteurs à large bande interdite (SiC, GaN) et des passifs intégrés à haute fréquence ont profondément renouvelé la conversion statique. Ils permettent aujourd'hui d'atteindre une densité de puissance accrue, un meilleur rendement, une tenue thermique améliorée et une compatibilité CEM renforcée. Dans les véhicules électriques et hybrides (VE/HH), la généralisation des bus DC s'impose naturellement puisqu'elle correspond à la nature des sources d'énergie (batteries, supercondensateurs, piles à combustible) et des charges. Dans ce contexte, les convertisseurs DC–DC assurent non seulement l'alimentation des auxiliaires, mais aussi la *gestion d'énergie multi-sources* en adaptant les tensions, en limitant l'ondulation côté source et en autorisant des flux bidirectionnels [63].

Le choix d'une topologie de convertisseur repose sur quatre critères principaux :
(i) **L'isolation galvanique** : les structures non isolées (buck, boost, SEPIC, Ćuk) sont simples et compactes mais ne permettent pas de séparation électrique, tandis que les structures isolées (flyback, forward, push–pull, demi-pont, pont complet, DAB) offrent sécurité et immunité CEM au prix d'une complexité accrue.
(ii) **La réversibilité** : indispensable pour la récupération d'énergie (freinage régénératif) et les scénarios V2G, elle s'obtient avec des structures bidirectionnelles, isolées (p. ex. DAB) ou non isolées (buck–boost bidirectionnel, SEPIC réversible).
(iii) **La symétrie de structure** : certaines topologies, comme le DAB ou les convertisseurs multiniveaux, facilitent le transfert d'énergie dans les deux sens et permettent une meilleure répartition des contraintes électriques.
(iv) **Le mode de transfert et le rapport de conversion** : le transfert direct (sans transformateur) privilégie la compacité et le rendement, tandis que le transfert indirect (avec transformateur) facilite l'isolation galvanique et l'adaptation à des tensions élevées.

Comme cité dans [64, 65], l'ensemble de ces critères est synthétisé dans le tableau I.2, qui classe les convertisseurs DC–DC selon le caractère isolé ou non isolé, réversible ou non, ainsi que la nature du transfert d'énergie. Ce tableau met en évidence la grande variété de topologies disponibles, chacune répondant à des compromis spécifiques en termes de rendement, complexité, sécurité et réversibilité.

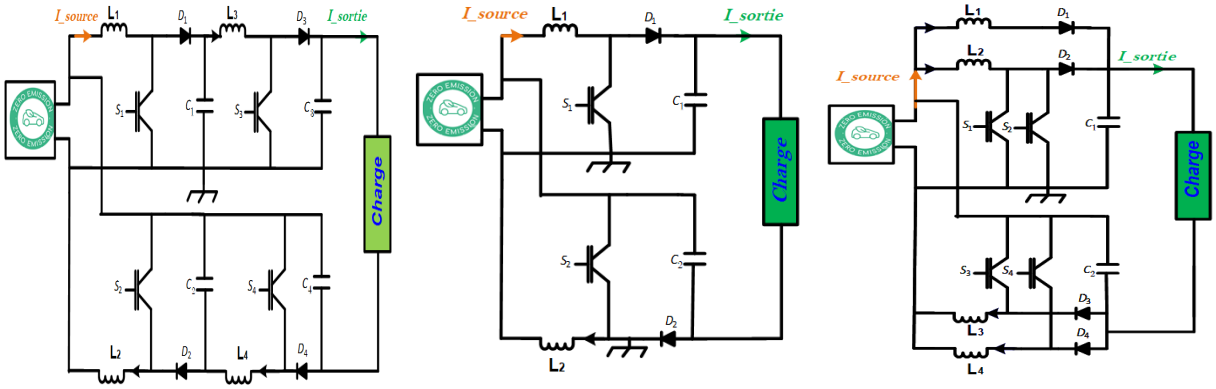
Tableau I.2: Récapitulatif des structures de conversion DC–DC

Convertisseurs DC–DC					
Structures non isolées			**Structures isolées**		
Structures réversibles	**Structures non réversibles**		**Structures symétriques**	**Structures asymétriques**	
	Transfert direct d'énergie	**Transfert indirect d'énergie**		**Transfert direct d'énergie**	**Transfert indirect d'énergie**
• Hacheur réversible en courant (2Q) • Hacheur réversible en tension (2Q) • Hacheur réversible en courant/tension (4Q)	*Structures abaisseuses* • Buck classique • Buck quadratique • Buck synchrone • Buck entrelacé n branches synchrones *Structures élévatrices* • Boost classique • Boost synchrone • Boost entrelacé n branches • Boost–Boost	*Structures abaisseuses/élévatrices/inverseuses* • Buck–Boost classique • Double Buck–Boost • Ćuk classique • Ćuk avec inductances couplées • Ćuk quadratique *Structures abaisseuses/élévatrices non inverseuses* • Buck–Boost modifié • SEPIC classique • SEPIC quadratique • ZETA classique • ZETA quadratique	• PUSH–PULL série • PUSH–PULL parallèle • Demi-pont • Pont complet	• FORWARD classique • FORWARD multi-sorties • FORWARD demi-pont asymétrique • FORWARD quasi-résonant	• Flyback classique • Flyback multi-sorties • Flyback demi-pont asymétrique • Flyback quasi-résonant

Pour les systèmes hybrides de nouvelle génération, marqués par des exigences de *haut gain et faible ondulation côté source*, trois approches technologiques se distinguent [66, 67, 68, 69]. L'**entrelacement multiphase**, en déphasant N voies identiques, permet de réduire fortement l'ondulation de courant à la fréquence de découpage (réduction de l'ordre de $1/N$), ce qui autorise l'utilisation de passifs plus compacts. Les **réseaux à capacités flottantes ou multiplicateurs**, quant à eux, augmentent le gain de conversion tout en répartissant les contraintes de tension, mais nécessitent une gestion fine de l'équilibrage des condensateurs et de leur amortissement [69]. Enfin, les **architectures multiniveaux et modulaires** apparaissent comme une solution prometteuse pour la montée en tension et l'isolation, en particulier lorsqu'elles sont associées à une liaison moyenne fréquence, bien que leur commande et leur protection soient plus complexes. Après la synthèse du tableau I.2, qui regroupe les principales topologies de conversion DC–DC, il est pertinent d'examiner plus en détail les structures non isolées à fort gain de tension, adaptées aux chaînes hybrides *pile à combustible PAC/batterie/supercondensateur*.

Ainsi, la sélection d'un convertisseur DC–DC dans un véhicule hybride ou électrique constitue toujours un compromis dicté par l'usage visé. Les structures non isolées dominent pour la conversion locale et les bus internes à haut rendement, tandis que les structures isolées s'imposent pour des applications nécessitant une sécurité renforcée. Les tendances actuelles entrelacement multi-

phase, réseaux flottants et architectures multiniveaux tracent la voie vers la prochaine génération de chaînes d'énergie embarquées et stationnaires [67, 68, 69, 63].



(a) Boost double étage flottant. (b) Double–Boost flottant FDB. (c) Entrelacé flottant (4 phases).

FIGURE I.10 : Topologies flottantes non isolées utilisées pour la comparaison.

Les schémas de **la Figure I.10**a, **Figure I.10**b et **Figure I.10**c illustrent trois approches représentatives. Leur comparaison s'appuie sur quatre critères essentiels : le **gain statique**, l'**ondulation côté source**, les **contraintes des semi-conducteurs**, et la **complexité de commande et de dimensionnement passif**. Cette analyse conduit naturellement au choix de l'entrelacement multiphase, et plus spécifiquement à une structure à **4 phases**, mieux adaptée aux exigences des VE/HEV modernes.

La Figure I.10a illustre cette structure composée de deux cellules flottantes en série, assurant un gain quadratique. Sous hypothèse idéale (régime CCM, $D_1 = D_2 = D$) :

$$M_a = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D_1)(1-D_2)} \approx \frac{1}{(1-D)^2}.$$

Cette topologie offre un gain élevé pour des rapports cycliques modérés (0.4–0.6) et répartit partiellement les contraintes de tension. En revanche, elle requiert un équilibrage actif ou passif des condensateurs flottants, et l'ondulation côté source reste comparable à celle d'un étage simple non entrelacé [67, 69].

La Figure I.10b présente une architecture plus compacte délivrant également un gain quadratique :

$$M_b \simeq \frac{1}{(1-D)^2}.$$

Par rapport au montage précédent, les chemins de conduction sont plus courts, réduisant ainsi les pertes. Cette topologie convient bien aux puissances moyennes [66]. Cependant, les capacités flottantes nécessitent un équilibrage rigoureux et la dynamique interne peut générer des résonances, tandis que l'ondulation côté PAC impose des filtres supplémentaires.

La Figure I.10c illustre la configuration de base entrelacée. Deux branches identiques, déphasées de π, partagent le courant et réduisent fortement l'ondulation d'entrée. Le gain reste celui de la cellule élémentaire :

$$M_c \simeq \frac{1}{1-D}.$$

Bien que le gain soit plus modeste, cette approche offre plusieurs avantages clés : compatibilité avec les PAC grâce à une ondulation d'entrée très réduite, partage naturel du courant entre phases (scalabilité), possibilité de *phase shedding* à faible charge, et intégration facilitée des protections.

Ainsi, l'analyse comparée des trois structures met en évidence les atouts de l'entrelacé 4 phases par rapport aux topologies quadratiques : rendement supérieur, robustesse accrue et

meilleure compatibilité avec les exigences dynamiques des véhicules hybrides. La suite du manuscrit est consacrée à la description détaillée de cette architecture, de sa loi de commande et de son dimensionnement magnétique, avant sa validation expérimentale.

I.5.1 Convertisseur entrelacé flottant 4 phases

Le choix du convertisseur entrelacé flottant à quatre phases s'explique par un ensemble d'arguments technologiques et scientifiques, largement étayés par la littérature récente. La topologie retenue, ainsi que le déphasage des voies et les principaux flux de puissance, sont illustrés en **Figure I.11**.

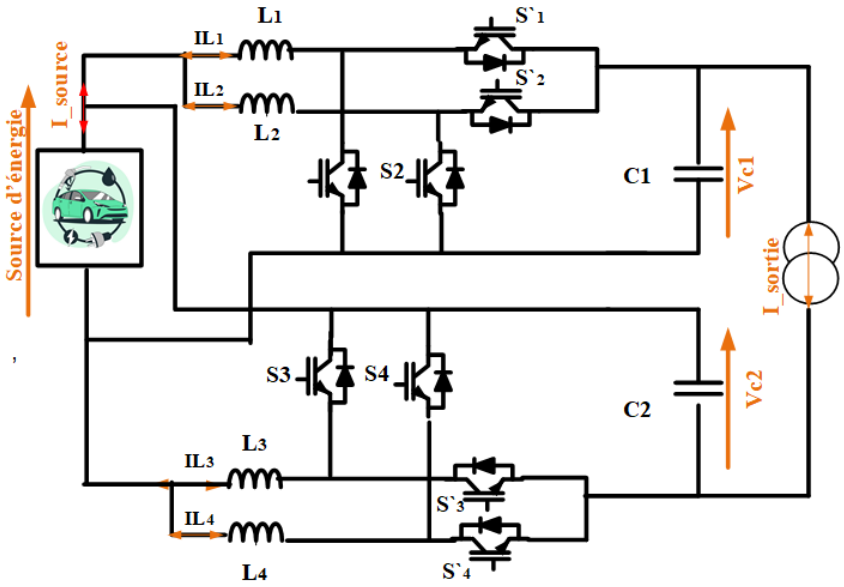


FIGURE I.11 : Schéma du convertisseur entrelacé flottant à quatre phases.

Dans les systèmes hybrides intégrant une pile à combustible (PAC), une batterie lithium-ion et une supercapacité, le convertisseur DC–DC constitue l'élément clé de l'interface énergétique. La PAC impose en particulier des contraintes strictes en termes de filtrage et de dynamique, son fonctionnement optimal nécessitant un courant d'entrée aussi lisse que possible afin d'éviter une dégradation prématurée et d'améliorer sa durée de vie [70, 71]. Dans ce contexte, les structures boost interlacées se sont imposées comme une solution privilégiée grâce à leur capacité à réduire significativement l'ondulation du courant d'entrée et à répartir les contraintes électriques et thermiques sur plusieurs branches. L'évolution naturelle de ces topologies a conduit au développement du convertisseur flottant interlacé multiphase, et plus spécifiquement d'une configuration à quatre phases, jugée optimale pour les applications de forte puissance et de haute fiabilité [72].

L'un des atouts majeurs de cette architecture réside dans la diminution de l'ondulation du courant côté source : pour N phases déphasées, l'ondulation fondamentale est réduite d'un facteur voisin de $1/N$. Une structure à quatre phases permet ainsi d'abaisser l'ondulation d'un ordre de grandeur par rapport à un boost simple, ce qui contribue à prolonger la durée de vie de la PAC, à réduire la taille des passifs (inductances et condensateurs), et à améliorer la compatibilité électromagnétique du système. Les travaux récents confirment que les topologies multiphases offrent un compromis optimal entre rendement, densité de puissance et filtrage naturel [66, 68]. La structure flottante entrelacée assure également un partage naturel du courant entre les branches, ce qui réduit les pertes de conduction, homogénéise les contraintes thermiques et confère au

convertisseur une excellente scalabilité. La puissance peut ainsi être augmentée sans accroître de manière excessive les contraintes sur les composants individuels [69]. De plus, grâce aux techniques modernes de commande comme le déphasage PWM distribué ou le *phase shedding*, il est possible d'adapter dynamiquement le nombre de phases actives selon la charge, améliorant encore l'efficacité énergétique en régime partiel.

Un avantage déterminant de cette topologie, mis en évidence par des recherches récentes, concerne **sa résilience face aux défauts**. Contrairement aux structures simples ou à double étage, un convertisseur entrelacé à quatre phases est capable de tolérer la perte d'une ou de plusieurs branches tout en maintenant un fonctionnement dégradé mais continu. Cette tolérance fonctionnelle, qui s'apparente à une forme de redondance matérielle, constitue un critère essentiel dans les applications embarquées où une interruption d'alimentation compromettrait directement la sécurité et la fiabilité du véhicule [73, 69].

Ainsi, le convertisseur entrelacé flottant à quatre phases combine plusieurs atouts majeurs : réduction drastique de l'ondulation côté source, partage équilibré des courants et meilleure gestion thermique, rendement élevé et compacité accrue, et enfin tolérance aux défauts permettant un fonctionnement en mode dégradé. Ces caractéristiques, confirmées par la littérature récente, en font une solution de référence pour l'hybridation PAC–batterie–supercapacité dans les véhicules électriques et hybrides modernes.

I.6 Méthodes de gestion d'énergie pour les VH et VE

La gestion d'énergie représente un levier stratégique majeur dans l'optimisation des performances, de la consommation énergétique et de la durabilité des véhicules (VH) et hybrides électrique (VE). Son objectif principal est de coordonner efficacement les contributions des différentes sources embarquées, telles que la batterie, le supercondensateur ou encore la pile à combustible en fonction des conditions de conduite, du profil de charge et de l'état des composants.

Une stratégie de gestion bien conçue permet non seulement de satisfaire la demande de puissance du conducteur, mais également de réduire la consommation de carburant, d'atténuer les contraintes sur les sources d'énergie et d'augmenter la longévité des composants de stockage. De plus, elle garantit le respect des contraintes de sécurité, de fonctionnement et de confort. Plusieurs approches de contrôle ont été proposées dans la littérature, allant des méthodes déterministes basées sur des règles fixes aux techniques d'optimisation temps réel ou prédictive [74, 75, 15].

I.7 Classification des stratégies de gestion d'énergie

La gestion optimale de l'énergie dans un système électrique multi-sources constitue un défi fondamental, en raison des interactions dynamiques et non linéaires entre les différentes unités de production et de stockage, telles que la pile à combustible, la batterie et le supercondensateur. L'objectif est d'assurer une répartition intelligente des flux énergétiques tout en respectant les contraintes opérationnelles (tensions, courants, température), les rendements énergétiques, ainsi que la longévité des composants électrochimiques.

De nombreuses approches ont été proposées dans la littérature pour répondre à ces exigences, chacune présentant des compromis entre complexité de mise en œuvre, efficacité énergétique et capacité d'adaptation en temps réel. Le diagramme I.12 illustre la classification des principales stratégies de gestion d'énergie appliquées aux véhicules électriques.

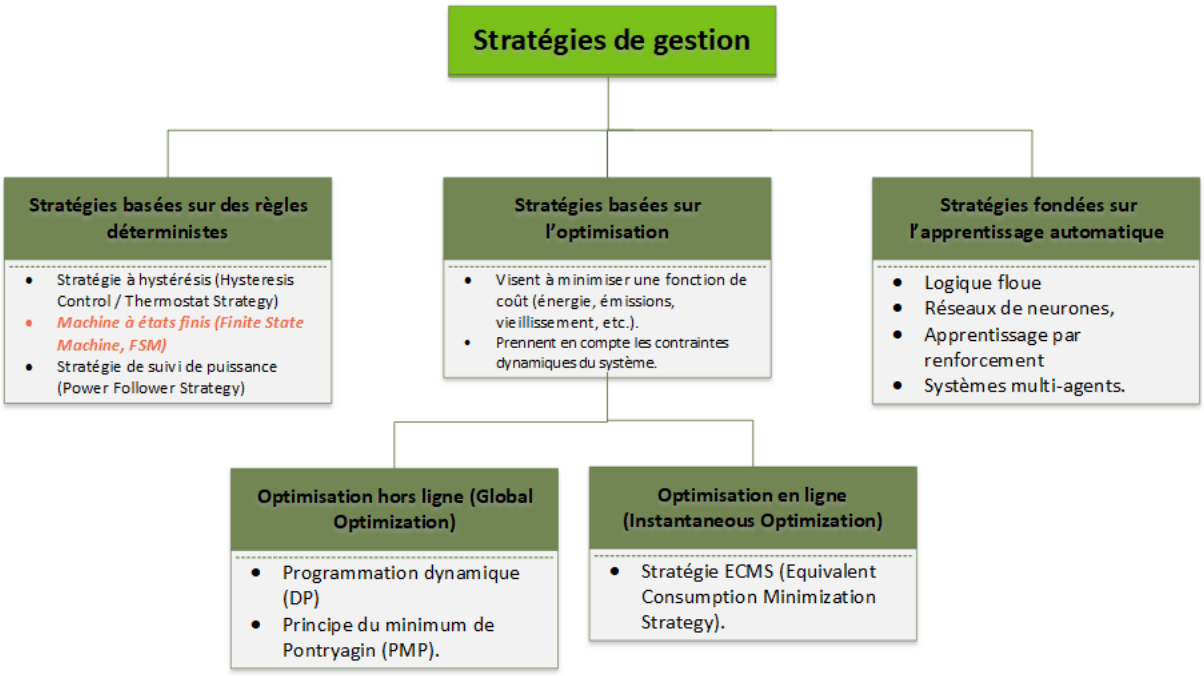


FIGURE I.12 : Classification des stratégies de gestion d'énergie pour un véhicule électrique hybride.

Les stratégies de gestion de l'énergie dans les véhicules électriques peuvent être classées selon différents critères, notamment le paradigme de décision adopté et le type d'optimisation mis en œuvre. Selon la revue de *Zhang et al.* [15], ces approches se regroupent généralement en trois grandes catégories :

- **Méthodes basées sur des règles (Rule-Based)** : elles reposent sur des algorithmes déterministes préétablis à partir d'expertise ou de scénarios typiques. Elles sont simples à implémenter et robustes, mais leur performance dépend fortement du profil de conduite. Ce type de stratégie est souvent utilisé pour un contrôle initial ou embarqué temps réel peu complexe [15, 76].
- **Méthodes d'optimisation** : cette catégorie regroupe les stratégies visant à minimiser une fonction de coût définie (énergie consommée, émissions, vieillissement des composants, etc.), tout en respectant les contraintes dynamiques du système. Elles se déclinent en deux sous-types selon la temporalité de l'optimisation :
  - **Optimisation hors ligne (Global Optimization)** : ces approches, telles que la programmation dynamique (DP) ou le principe du minimum de Pontryagin (PMP), permettent de calculer une solution optimale sur un cycle de conduite connu à l'avance. Leur précision est élevée, mais leur complexité de calcul les rend inadaptées à une application directe en temps réel [22, 26].
  - **Optimisation en ligne (Instantaneous Optimization)** : ces stratégies, comme la stratégie de minimisation de la consommation équivalente (ECMS), cherchent à optimiser le comportement du système à chaque instant. Elles constituent un compromis intéressant entre efficacité énergétique et faisabilité embarquée, avec une capacité d'adaptation aux conditions de conduite en temps réel [77, 78].
- **Méthodes basées sur l'intelligence artificielle (IA)** : elles incluent les approches par logique floue, réseaux de neurones, apprentissage par renforcement ou systèmes multi-

agents. Ces techniques permettent une gestion adaptative et évolutive dans des environnements incertains ou partiellement connus, tout en s'améliorant avec l'expérience [79].

I.8 Stratégies basées sur des règles déterministes

Les stratégies heuristiques reposant sur des règles déterministes constituent l'une des approches les plus répandues dans la gestion d'énergie des véhicules hybrides. Elles s'appuient sur une logique de commande fixe, construite à partir de seuils définis (tension, puissance, état de charge, etc.), sans recours à l'optimisation dynamique ou à la prédiction du profil de conduite.

Leur succès s'explique par plusieurs avantages : une mise en œuvre simple, une faible complexité algorithmique, une grande robustesse face aux incertitudes du système, et une bonne compatibilité avec les plateformes embarquées à ressources limitées [80, 81]. Bien qu'elles n'offrent pas d'optimalité globale, leur efficacité opérationnelle dans les scénarios réels leur confère une légitimité industrielle, comme en témoigne leur intégration dans des véhicules hybrides commercialisés, tels que la Toyota Prius.

I.8.1 Stratégie à hystérésis (Thermostat)

La stratégie dite « Thermostat » ou commande à hystérésis est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus répandues dans la littérature en matière de régulation. Inspirée des systèmes de contrôle classiques, elle repose sur le maintien d'une variable contrôlée dans une plage délimitée par deux seuils, inférieur et supérieur. L'action de commande est enclenchée lorsque le seuil bas est franchi, puis désactivée dès que la limite haute est atteinte. Cette logique binaire, simple et robuste, a longtemps été privilégiée dans des applications où la priorité est donnée à la stabilité et à la protection du système plutôt qu'à la recherche d'une performance optimale [82, 83].

Dans le domaine de la gestion d'énergie, plusieurs travaux ont transposé ce principe pour assurer l'équilibrage et la protection des systèmes multi-sources. L'idée est alors de garantir que chaque composant reste dans une plage de fonctionnement acceptable, en limitant par exemple les excursions extrêmes de charge ou de puissance. Cette approche a été adoptée dans différents contextes, notamment pour coordonner l'utilisation de sources énergétiques complémentaires, grâce à sa facilité de mise en œuvre et à son faible coût computationnel [81, 84]. Elle permet en particulier d'assurer une logique de commande robuste sans nécessiter de prédiction du profil de charge, ce qui explique sa large diffusion dans les systèmes embarqués contraints en ressources [85].

Cependant, la littérature souligne également les limites de cette méthode. Plusieurs études montrent que, bien qu'efficace pour maintenir les variables dans des plages sécurisées, la commande à hystérésis engendre des commutations fréquentes qui peuvent dégrader le rendement global du système et accélérer l'usure des composants [80, 75]. De plus, son caractère strictement local ne permet pas d'anticiper les besoins futurs ni d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles dans des scénarios de conduite complexes ou fluctuants [15]. Ces insuffisances expliquent pourquoi la stratégie « Thermostat », souvent considérée comme une solution de référence, est aujourd'hui principalement utilisée comme point de comparaison ou comme base à partir de laquelle des approches plus évoluées, adaptatives, prédictives ou hybrides, ont été développées dans la littérature récente [86].

I.8.2 Stratégie de suivi de puissance (Power Follower)

La stratégie dite « Power Follower » est une approche déterministe largement décrite dans la littérature sur la gestion d'énergie des systèmes hybrides. Elle repose sur une hiérarchisation

explicite des sources d'énergie : une source principale, généralement le moteur thermique, couvre la majorité des besoins en puissance, tandis que la source secondaire, souvent la machine électrique, intervient en soutien pour corriger les déficits transitoires. Cette logique vise à exploiter la source principale dans une plage de fonctionnement proche de son rendement optimal, tout en bénéficiant de la flexibilité et de la réactivité de la source secondaire [80, 22].

L'intérêt de cette stratégie réside dans sa simplicité de mise en œuvre et sa cohérence avec les architectures hybrides parallèles, où les deux motorisations peuvent coopérer mécaniquement. Elle permet d'améliorer l'efficacité globale en lissant les variations de charge de la source principale, réduisant ainsi les pertes liées aux régimes instables et prolongeant la durée de vie des composants [85]. De plus, le recours à la machine électrique lors des phases de basse vitesse, d'accélération ou de freinage régénératif permet de valoriser des scénarios de récupération d'énergie et de limiter la consommation de carburant dans des conditions de conduite variées [84, 86].

Néanmoins, la stratégie « Power Follower » présente également des limites identifiées dans plusieurs travaux. D'une part, elle reste fortement dépendante de la calibration des seuils de répartition de puissance et ne prend pas en compte les conditions de conduite futures, ce qui peut conduire à des décisions sous-optimales dans des cycles dynamiques complexes [80]. D'autre part, son caractère hiérarchique tend à privilégier la source principale au détriment d'une gestion plus équilibrée des ressources, réduisant son efficacité énergétique dans des configurations multi-sources plus avancées. Enfin, cette approche ne tient pas compte de l'état de santé ou des contraintes thermiques des composants, ce qui peut limiter sa pertinence pour des applications de longue durée [15].

Pour pallier ces insuffisances, la littérature récente a exploré des extensions de la stratégie « Power Follower », notamment en intégrant des logiques adaptatives ou floues, ou en la combinant avec des modèles prédictifs. Ces évolutions permettent de conserver la simplicité et la robustesse de la méthode initiale tout en améliorant sa performance dans des environnements réels. Ainsi, bien que considérée comme une solution rudimentaire, la stratégie « Power Follower » reste un point de référence incontournable, fréquemment utilisée comme base de comparaison pour évaluer des approches plus avancées dans la gestion d'énergie des systèmes hybrides modernes.

I.8.3 Stratégies déterministes et commande par machine d'états

Les stratégies déterministes, également appelées *rule-based*, constituent l'une des approches les plus répandues pour la gestion d'énergie des véhicules électriques et hybrides. Elles reposent sur une connaissance approfondie du comportement dynamique du système ainsi que sur des considérations pratiques liées aux performances des composants. Leur principe est d'établir des lois de gestion simples et directement implémentables dans des calculateurs embarqués à ressources limitées [87]. Ces stratégies prennent la forme d'un ensemble de règles implicites ou explicites, construites à partir de scénarios types de conduite. Parmi les principes les plus couramment adoptés, on peut citer le fonctionnement tout électrique à basse vitesse, le freinage régénératif prioritaire, ou encore le maintien de l'état de charge de la batterie dans une plage opérationnelle sécurisée [88, 89, 87, 90].

Une déclinaison particulièrement répandue de ces approches consiste à modéliser le système hybride au moyen d'une machine d'états finis. Le fonctionnement global est alors décomposé en un ensemble de modes distincts, tout électrique, thermique, hybride, ou encore recharge, chacun correspondant à une configuration particulière des moteurs et des flux d'énergie. Le passage d'un mode à l'autre est gouverné par des conditions logiques simples basées sur des variables mesurables telles que la vitesse du véhicule, le couple demandé, ou l'état de charge

des dispositifs de stockage [83, 22, 15]. Cette structuration permet de clarifier la commande, de réduire la complexité algorithmique et d'offrir une grande interprétabilité du fonctionnement du système [91].

Ainsi, les règles déterministes et la machine d'états apparaissent comme deux facettes complémentaires d'une même famille de stratégies heuristiques. Alors que les règles offrent une souplesse d'adaptation aux conditions de conduite, la machine d'états fournit une formalisation claire et rigoureuse des modes de fonctionnement. Malgré certaines limites théoriques face aux approches d'optimisation globale — notamment l'absence d'anticipation sur l'évolution du cycle de conduite — ces méthodes demeurent aujourd'hui largement utilisées dans la recherche comme dans l'industrie automobile. Leur succès repose sur leurs points forts : simplicité de mise en œuvre, robustesse face aux conditions variables, et parfaite adéquation avec les contraintes des calculateurs embarqués [75, 92, 93].

I.8.4 Optimisation hors ligne (Global Optimization)

Les approches dites "hors ligne" utilisent des algorithmes puissants comme la **programmation dynamique (Dynamic Programming, DP)** ou le **principe du minimum de Pontryagin (Pontryagin's Minimum Principle, PMP)** pour déterminer, sur un cycle de conduite connu à l'avance, la séquence optimale d'actions à entreprendre [94, 78]. Ces techniques garantissent une solution mathématiquement optimale, permettant d'évaluer le potentiel maximal de gain énergétique du système.

Cependant, leur implémentation pratique reste limitée. Leur complexité computationnelle, le besoin d'un cycle de conduite prédéfini et l'impossibilité de gérer des événements aléatoires ou des comportements imprévus en temps réel restreignent leur usage à des phases de simulation ou de calibration hors ligne [95, 26].

I.8.5 Optimisation en ligne (Instantaneous Optimization)

À l'opposé, les méthodes d'optimisation en ligne visent à prendre des décisions à chaque instant en fonction de l'état actuel du système et de la demande de puissance. Parmi les plus connues figure la **stratégie de minimisation de la consommation équivalente (Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS)**. Cette méthode transforme l'énergie électrique consommée ou stockée en équivalent carburant via des facteurs de pénalisation, et optimise la répartition de puissance à chaque pas de temps [77].

Ces approches offrent un compromis pertinent entre efficacité énergétique et faisabilité de mise en œuvre embarquée. Leur capacité à fonctionner en temps réel sans connaissance préalable du cycle de conduite les rend attractives pour les applications industrielles avancées [78]. Toutefois, leur performance dépend fortement du calibrage des coefficients d'équivalence, qui doivent être ajustés dynamiquement en fonction des conditions de conduite.

I.8.6 Limites et justification du non-choix dans cette thèse

Bien que les stratégies d'optimisation offrent des performances théoriquement élevées, elles présentent plusieurs limites dans le cadre de cette recherche :

- Elles nécessitent souvent des modèles précis du véhicule et des sources d'énergie, difficiles à identifier dans un contexte expérimental réel ;
- Leur implémentation embarquée peut s'avérer coûteuse en calcul, surtout pour les stratégies globales ;

- Les méthodes comme ECMS requièrent un calibrage fin et adaptatif, ce qui peut complexifier le développement sur une plateforme de type OPAL-RT.

I.9 Méthodes de gestion d'énergie basées sur l'intelligence artificielle

Les approches de gestion d'énergie fondées sur l'intelligence artificielle (IA) ont gagné en popularité ces dernières années, en raison de leur capacité à s'adapter à des environnements complexes, dynamiques et incertains. Contrairement aux méthodes déterministes ou purement optimisées, ces stratégies reposent sur des modèles d'apprentissage ou d'inférence qui permettent une prise de décision flexible et évolutive, en s'appuyant sur l'expérience accumulée ou des données contextuelles.

Parmi les techniques les plus utilisées, on distingue :

- **La logique floue (Fuzzy Logic)** : permet de représenter des règles de gestion qualitatives à partir d'expertises humaines, avec des variables linguistiques et des degrés d'appartenance. Elle est robuste face aux incertitudes et facile à implémenter dans des systèmes embarqués [96].
- **Les réseaux de neurones (Artificial Neural Networks, ANN)** : capables d'apprendre des relations complexes entre les variables d'état du véhicule (vitesse, SOC, demande de puissance, température, etc.) et la stratégie de gestion optimale. Une fois entraînés, ils peuvent fournir des décisions quasi instantanées [15].
- **L'apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning, RL)** : repose sur un agent qui interagit avec l'environnement et apprend, par essais-erreurs, une politique de gestion qui maximise une récompense cumulative. Des variantes modernes comme le Deep Reinforcement Learning (DRL) intègrent des réseaux neuronaux profonds pour modéliser des politiques complexes dans des environnements continus [24, 97].
- **Les systèmes multi-agents** : permettent la coordination décentralisée de plusieurs sources ou unités énergétiques (pile à combustible, batterie, supercondensateur), chacun étant modélisé comme un agent autonome optimisant ses propres objectifs tout en interagissant avec les autres [98].

I.9.1 Limites et justification du non-choix de l'approche IA

Les approches d'intelligence artificielle (IA) présentent plusieurs atouts indéniables dans le domaine de la gestion d'énergie. Elles offrent en effet une grande adaptabilité face aux variations de conduite et aux incertitudes environnementales, ainsi qu'une capacité d'auto-amélioration grâce à l'apprentissage continu. De plus, elles permettent de traiter efficacement des données non linéaires et multidimensionnelles, tout en réduisant la dépendance vis-à-vis des modèles analytiques classiques du système.

Cependant, ces méthodes soulèvent également un certain nombre de défis. Elles nécessitent la constitution de bases de données d'entraînement fiables et représentatives, ce qui n'est pas toujours accessible dans les phases initiales d'un projet de recherche. Leur complexité algorithmique importante limite leur compatibilité avec les calculateurs embarqués aux ressources restreintes. À cela s'ajoute une explicabilité souvent limitée des décisions, en particulier pour les réseaux de neurones profonds, ainsi que des temps d'apprentissage parfois longs et difficilement conciliables avec les contraintes de fonctionnement temps réel.

Bien que prometteuses, ces stratégies n'ont donc pas été retenues dans le cadre de cette thèse. L'objectif poursuivi est en effet de proposer une solution simple, transparente et robuste, aisément intégrable dans un contrôleur temps réel tel qu'OPAL-RT. En outre, l'absence d'une base de données représentative des conditions réelles dès les premières étapes du projet rendait l'application de l'IA difficilement envisageable. Enfin, la validation expérimentale sur banc HIL impose de privilégier des stratégies déterministes, bien comprises et maîtrisées à chaque étape de fonctionnement, ce qui explique le choix d'approches classiques mais éprouvées.

I.10 Motivation du choix méthodologique dans cette thèse

Dans le cadre de cette thèse, une stratégie de gestion d'énergie fondée sur des règles déterministes a été retenue pour piloter le système hybride multi-sources composé d'une pile à combustible, d'une batterie lithium-ion et d'une supercapacité. Ce choix s'appuie sur des considérations à la fois techniques, pratiques et expérimentales, tenant compte des contraintes inhérentes aux systèmes embarqués.

Tableau I.3: Analyse comparative des principales stratégies de gestion d'énergie

Approche	**Avantages**	**Inconvénients**	**Compatibilité temps réel**
Règles déterministes (FSM)	Simple, robuste, faible coût de calcul, facile à implémenter et valider	Sous-optimal, peu flexible face aux conditions variables, nécessite un réglage manuel	**Excellente**
Logique floue	Permet des transitions douces, meilleure souplesse qu'une logique rigide	Difficile à calibrer, performance dépendante des règles et fonctions d'appartenance	**Bonne**
Optimisation globale (DP, AG)	Performance énergétique optimale, prise en compte de l'horizon complet	Très coûteux en calcul, dépend du profil futur, non adapté à l'embarqué	**Faible / hors ligne**
Optimisation locale (ECMS)	Bon compromis entre efficacité et complexité, applicable en ligne	Sensibilité au choix des coefficients d'équivalence, calibrage nécessaire	**Bonne à très bonne**
Approches stochastiques	Gestion de l'incertitude, adaptatif aux conditions variables	Modèles probabilistes requis, coût de calcul important	**Moyenne**
Méthodes prédictives (cycle, route)	Anticipation du profil, amélioration du rendement en combinaison avec d'autres EMS	Nécessite des capteurs avancés ou une base de données d'apprentissage	**Bonne, avec traitement anticipatif**

La Table I.3 présente une synthèse comparative des principales approches de gestion d'énergie identifiées dans la littérature. On y observe que les stratégies à base de règles (type FSM – Finite State Machine) se distinguent par leur excellent niveau de compatibilité avec les exigences du temps réel, leur faible coût de calcul, leur simplicité de mise en œuvre, ainsi que leur robustesse dans les conditions opérationnelles. Ces caractéristiques en font une solution particulièrement adaptée pour un déploiement embarqué dans des architectures complexes à sources multiples.

Les approches déterministes se distinguent ainsi par une compatibilité maximale avec les contraintes temps réel, ce qui est primordial dans les environnements embarqués contraints en puissance de calcul. Comme le confirment *Zhang et al.*[15] et *Panday et al.*[85], ces stratégies

sont particulièrement efficaces dans les phases de prototypage, de validation rapide, ou dans des contextes nécessitant une grande traçabilité des décisions.

De plus, ces méthodes sont naturellement robustes face aux perturbations exogènes (changement de profil de conduite, température ambiante, variation de charge), et permettent une adaptation dynamique à l'état du système (SoC batterie, température, puissance requise). Elles ne nécessitent ni connaissance a priori du profil de conduite, ni phase d'apprentissage coûteuse, contrairement aux méthodes à base d'intelligence artificielle ou d'optimisation globale, souvent inadaptées aux contraintes embarquées à faible latence [22].

La stratégie déterministe adoptée permet ainsi d'assurer une répartition énergétique fiable entre les différentes sources (PAC, batterie, supercondensateur), tout en conservant une structure simple, facilement intégrable dans des simulateurs temps réel comme OPAL-RT. Son usage est particulièrement pertinent dans les phases de validation HIL, où la stabilité, la traçabilité et la rapidité de réaction sont cruciales [99]. En résumé, au regard des avantages présentés dans le tableau comparatif I.3, la stratégie à base de règles déterministes constitue une solution cohérente avec les objectifs de cette thèse. Elle assure un bon compromis entre robustesse, simplicité de calcul, performance acceptable, et implémentation sur plateforme temps réel, répondant ainsi aux exigences spécifiques d'un système hybride multi-sources validé expérimentalement.

I.11 Surveillance de la batterie

Les observateurs jouent un rôle essentiel dans l'ingénierie des systèmes dynamiques, permettant d'estimer des états internes inaccessibles à la mesure directe. Ils sont largement utilisés dans les domaines du contrôle, du diagnostic et des systèmes embarqués. Leur application à la surveillance des batteries est particulièrement cruciale, notamment pour l'estimation de l'état de charge (*State of Charge - SOC*) et de l'état de santé (*State of Health - SOH*), des paramètres essentiels pour garantir la sécurité et la performance des systèmes de stockage d'énergie.
Un observateur désigne un dispositif algorithmique, ou dans certains cas matériel, destiné à estimer les variables internes non mesurables d'un système dynamique à partir d'un ensemble de mesures accessibles et d'un modèle mathématique du système. Concrètement, la conception d'un observateur repose sur les éléments suivants :

$$\hat{x}(k+1) = f(\hat{x}(k), u(k)) + K(y(k) - \hat{y}(k)) \tag{I.1}$$

où $\hat{x}$ est l'état estimé, y la mesure du système, u l'entrée du système et K est le gain de l'observateur ajusté pour minimiser l'erreur d'estimation. Parmi les classes d'observateurs les plus utilisées, on distingue :

- **L'observateur de Luenberger** : Conçu pour les systèmes linéaires, il repose sur un modèle mathématique simplifié et est efficace lorsque les conditions du système sont bien connues [100].

- **Les filtres de Kalman** : Utilisés pour des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires, ils permettent une estimation optimale en présence de bruit de mesure et de modélisation [101].

- **Les observateurs à mode glissant** : Robustes face aux incertitudes et aux perturbations externes, ils sont particulièrement adaptés aux systèmes non linéaires [102].

I.11.1 Motivation et principes généraux

Dans de nombreuses applications industrielles, il n'est pas possible de mesurer toutes les variables d'état d'un système en raison de contraintes technologiques (coût, fiabilité des capteurs, dérive, bruit, etc.). La commande, la surveillance ou l'identification des systèmes nécessitent cependant une connaissance précise de ces états. Pour pallier ce manque, on utilise des **observateurs** : des structures dynamiques permettant de reconstruire les états non mesurés à partir des entrées et des sorties du système, et d'un modèle mathématique associé [103].

I.11.2 Observabilité des systèmes linéaires

L'observabilité est une propriété fondamentale en théorie du contrôle, définissant la capacité à reconstruire les états internes d'un système à partir des seules mesures de sortie et des entrées connues. Considérons le système linéaire invariant dans le temps :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \tag{I.2}$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ l'entrée de commande, et $y(t) \in \mathbb{R}^p$ la sortie mesurée. Ce système est dit observable si, pour toute trajectoire admissible, la connaissance de $y(t)$ et $u(t)$ sur un intervalle de temps fini permet de déterminer de façon unique l'état initial $x(0)$. Cette condition est équivalente à la pleine rangée de la matrice d'observabilité $\mathcal{O}$:

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \tag{I.3}$$

Le système est observable si et seulement si $\text{rank}(\mathcal{O}) = n$ [104].

- **Observateur de Luenberger** : Lorsque le système est observable, un observateur d'état peut être conçu selon l'approche de Luenberger. Celui-ci estime les états internes à partir des mesures de sortie et du modèle dynamique :

  $$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \tag{I.4}$$

  où $\hat{x}$ est l'estimation de l'état réel x, et L est le gain de l'observateur à déterminer. L'erreur d'estimation $e = x - \hat{x}$ évolue selon :

  $$\dot{e} = (A - LC)e \tag{I.5}$$

  Le choix de L permet de placer les pôles de la matrice $(A - LC)$ dans le demi-plan gauche du plan complexe, assurant ainsi la convergence exponentielle de $\hat{x}$ vers x. Ce type d'observateur est particulièrement adapté aux systèmes linéaires déterministes [100, 105].

- **Filtre de Kalman (cas stochastique)** En présence de bruits aléatoires affectant à la fois les dynamiques internes et les mesures, le filtre de Kalman fournit une solution optimale au sens des moindres carrés. Le modèle s'écrit alors :

  $$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases} \tag{I.6}$$

où $w(t)$ et $v(t)$ sont des bruits blancs gaussiens de covariance Q et R respectivement. Le filtre de Kalman construit une estimation $\hat{x}(t)$ en résolvant l'équation de Riccati différentielle pour la matrice de covariance de l'erreur $P(t)$:

$$\dot{P} = AP + PA^T - PC^T R^{-1} CP + Q \tag{I.7}$$

et en calculant le gain optimal :

$$K = PC^T R^{-1} \tag{I.8}$$

Ce filtre est considéré comme optimal pour des systèmes linéaires bruités avec des perturbations gaussiennes stationnaires [106, 107].

- **Observateurs à mode glissant :** ces observateurs reposent sur la théorie du contrôle robuste par modes glissants. Dans ce cadre, l'objectif est d'estimer les états non mesurables en utilisant un modèle linéaire du système et des mesures de sortie accessibles. L'intérêt majeur de cette approche réside dans sa robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques et des perturbations externes, grâce à l'utilisation d'une loi de commutation discontinue qui force la dynamique de l'erreur d'estimation à converger vers un hyperplan défini. Ainsi, l'estimation reste précise même en présence de variations ou de bruits modérés.

I.11.3 Observabilité des systèmes non linéaires

Dans le cas non linéaire, le système dynamique s'exprime généralement sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \tag{I.9}$$

L'analyse de l'observabilité ne repose plus sur une matrice constante, mais sur une condition locale fondée sur les dérivées successives de la sortie y par rapport aux états via les dérivées de Lie. Une condition suffisante d'observabilité locale repose sur le rang de la matrice jacobienne suivante :

$$\mathcal{O}_{nl}(x) = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial h(x)}{\partial x} \\ \dfrac{\partial L_f h(x)}{\partial x} \\ \dfrac{\partial L_f^2 h(x)}{\partial x} \\ \vdots \\ \dfrac{\partial L_f^{n-1} h(x)}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{I.10}$$

où $L_f h(x)$ désigne la dérivée de Lie de $h(x)$ le long du champ de vecteurs $f(x, u)$. Le système est localement observable au point x_0 si le rang de $\mathcal{O}_{nl}(x_0)$ est maximal, c'est-à-dire égal à n [108, 103].

Cette approche permet d'évaluer la capacité à reconstruire les états dans un voisinage de x_0, et constitue la base théorique pour la conception d'observateurs non linéaires tels que les observateurs de Luenberger étendus, les filtres de Kalman étendus (EKF), les filtres unscented (UKF), ou encore les observateurs en mode glissant.

Dans le cadre de l'estimation d'états pour **des systèmes dynamiques non linéaires**, plusieurs structures d'observateurs ont été développées, tirées d'approches initialement conçues pour les systèmes linéaires mais étendues à des contextes non linéaires via des techniques d'approximation locale. Les deux approches les plus répandues dans la littérature sont l'observateur de Luenberger étendu et le filtre de Kalman étendu.

- **L'observateur de Luenberger étendu (ELO)** : cette approche repose sur une linéarisation locale du système autour d'un point d'équilibre ou d'une trajectoire de fonctionnement. Elle permet d'étendre la structure classique de l'observateur de Luenberger aux systèmes non linéaires, en introduisant une loi de correction proportionnelle à l'erreur de sortie. Cette méthode est relativement simple à implémenter et offre de bonnes performances lorsque les non-linéarités sont modérées et bien modélisées [108].

- **Le filtre de Kalman étendu (EKF)** : il s'agit d'une généralisation du filtre de Kalman linéaire à des systèmes non linéaires. Le principe consiste à effectuer une linéarisation locale du modèle à chaque instant par développement de Taylor au premier ordre, afin d'appliquer la structure récursive du filtre de Kalman. L'EKF est largement utilisé en raison de sa capacité à intégrer les incertitudes statistiques sur les états et les mesures, mais sa précision dépend fortement de la validité de la linéarisation et des hypothèses gaussiennes [109].

- **Observateurs à mode glissant :** dans le cas des **systèmes non linéaires**, les observateurs à mode glissant ont été adaptés en généralisant la structure initialement développée pour les systèmes linéaires. L'idée est d'utiliser des fonctions de commutation et des surfaces de glissement définies à partir d'un modèle non linéaire, ou bien d'introduire une approximation locale autour d'un point de fonctionnement. Ces observateurs conservent la robustesse caractéristique de la commande par modes glissants, mais permettent en plus de traiter les non-linéarités et les incertitudes plus importantes du modèle. Ils sont donc particulièrement adaptés aux systèmes dynamiques complexes, tels que les dispositifs électrochimiques ou les convertisseurs d'énergie [110, 111, 112].

Cependant, les méthodes classiques telles que l'ELO et l'EKF présentent des limitations importantes dans le cas de systèmes fortement non linéaires, de modèles incertains ou soumis à des bruits de mesure significatifs. L'EKF, par exemple, peut devenir instable si le modèle est mal linéarisé ou si les incertitudes statistiques sont mal caractérisées. De même, l'observateur de Luenberger étendu perd en robustesse lorsque les dynamiques non linéaires dominent le comportement du système [113, 114]. Ces limitations ont motivé le développement d'observateurs plus robustes, tels que les observateurs en mode glissant [115, 111, 112].

I.11.4 Motivation du choix de l'observateur SMO

Les observateurs en *mode glissant* (Sliding Mode Observers - SMO) apparaissent comme une alternative robuste, notamment dans les systèmes de puissance électrique comme les batteries, supercondensateurs, et piles à combustible. Le SMO permet :

- Une estimation robuste face aux incertitudes paramétriques,

- Une convergence en temps fini de l'erreur d'estimation,

- Une tolérance aux perturbations et aux défauts capteurs.

Le chapitre III sera dédié à la formulation et l'implémentation de cet observateur non linéaire robuste appliqué à la supervision du SOC et à la détection de défauts dans une batterie lithium-ion.

I.12 Observateur en Mode Glissant : principe et application dans la supervision de batterie

Dans le cadre de notre travail de recherche portant sur la supervision des batteries lithium-ion dans des systèmes hybrides (PAC-Batterie-Supercapacité), nous avons adopté pour une approche d'estimation robuste de l'état de charge (SOC) et du courant de court-circuit interne en intégrant un **observateur en mode glissant** (Sliding Mode Observer, SMO). Cette méthode s'est révélée particulièrement adaptée aux systèmes à forte non-linéarité et soumis à des incertitudes paramétriques, comme c'est le cas pour les batteries vieillissantes ou en fonctionnement dynamique intensif.

I.12.1 Principe général de l'observateur en mode glissant

L'observateur en mode glissant (SMO, pour *Sliding Mode Observer*) est une technique robuste permettant l'estimation d'états internes de systèmes dynamiques, en particulier dans un contexte incertain ou bruité. Le principe repose sur la génération d'une dynamique d'estimation qui force l'erreur de sortie à converger vers une *surface de glissement*, au-delà de laquelle l'estimation devient asymptotiquement exacte malgré les perturbations ou incertitudes [116, 117].

Pour un système non linéaire général défini par :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \tag{I.11}$$

la structure de l'observateur SMO s'écrit :

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + G \cdot \text{sign}(y - \hat{y}) \tag{I.12}$$

où $\hat{y} = h(\hat{x})$, et G est un gain de correction conçu pour rendre la surface de glissement $s(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ attractive.

L'objectif est que l'estimation converge en présence d'incertitudes ou de perturbations, ce qui fait du SMO un outil privilégié dans les systèmes électrochimiques fortement non linéaires comme les batteries lithium-ion [118, 119].

I.12.2 Phases de convergence de l'estimation

La dynamique de convergence du SMO comprend deux phases distinctes :

- **Phase d'atteinte** : l'erreur de sortie $e_y = y - \hat{y}$ converge vers zéro en temps fini, assurant que la trajectoire de l'erreur rejoint la surface de glissement $s(t) = 0$.
- **Phase de glissement** : une fois la surface atteinte, le système reste contraint sur celle-ci et les erreurs d'état $e_x = x - \hat{x}$ convergent de manière asymptotique vers zéro, sous certaines conditions de stabilité.

Ce mécanisme garantit une forte robustesse aux perturbations de mesure et aux incertitudes paramétriques [120].

I.12.3 Application à un modèle de batterie

Considérons un modèle équivalent de batterie basé sur la représentation de Thévenin d'ordre réduit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \tag{I.13}$$

où $x(t) = [V_{RC}, SOC]^T$ représente la tension dynamique et l'état de charge.

L'observateur en mode glissant associé peut alors être écrit sous la forme :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G \cdot \text{sign}(y - C\hat{x}) \tag{I.14}$$

Le vecteur G est choisi de manière à compenser les incertitudes dynamiques et à garantir la convergence en temps fini de l'erreur d'estimation.

I.12.4 Conditions de glissement et convergence

Une fonction de Lyapunov classique est définie comme $V(e) = \frac{1}{2}e^T e$, avec $e = y - \hat{y}$. Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V} = e^T C(A - GC)e \tag{I.15}$$

Afin d'assurer la stabilité du système d'estimation, il est requis que $\dot{V} < 0$, ce qui impose une condition sur le placement des pôles de la matrice $(A - GC)$. Un choix approprié du gain G permet de satisfaire cette condition même en présence de perturbations stochastiques ou déterministes [121].

I.12.5 Avantages pour la supervision de batteries

L'utilisation d'un observateur en mode glissant pour la gestion d'état des batteries lithium-ion présente plusieurs avantages significatifs :

- Estimation précise et robuste du SOC même en cas de défauts capteurs ou de variations paramétriques du modèle.
- Détection précoce de défauts internes graves tels que les courts-circuits internes, via le suivi des résidus d'estimation.
- Capacité intrinsèque de filtrage vis-à-vis des bruits de mesure, grâce à la discontinuité contrôlée de la loi de commande (effet de rejet de perturbation).

Ces propriétés font du SMO un outil particulièrement adapté pour la surveillance des sources électrochimiques embarquées dans les véhicules électriques et les systèmes hybrides de stockage [118].

I.13 Défauts des batteries

Les batteries lithium-ion, largement utilisées dans les systèmes de stockage et les véhicules électriques, peuvent être sujettes à différents types de défauts susceptibles d'affecter leur performance, leur durabilité et surtout leur sûreté. Ces défauts se traduisent par des dégradations progressives ou soudaines, dont les conséquences peuvent aller d'une perte de capacité énergétique à des incidents critiques comme l'emballement thermique. Afin de mieux comprendre et caractériser ces phénomènes, il est essentiel de regrouper les défauts selon leur nature et leurs mécanismes d'apparition.

La littérature distingue généralement trois grandes familles : les défauts chimiques, qui résultent de phénomènes internes tels que le vieillissement des électrodes ou la formation de dendrites ; les défauts électriques, liés à des anomalies de tension ou à des courts-circuits internes ; et enfin les défauts mécaniques, englobant notamment les perforations du séparateur ou les défaillances des connexions inter-cellules. Le tableau I.4 propose une synthèse de cette classification, en précisant pour chaque catégorie les mécanismes typiques et les risques associés [122].

Tableau I.4: Classification des défauts des batteries lithium-ion

Catégorie de défaut	**Mécanisme / Type**	**Conséquences / Risques**
Défauts chimiques	Vieillissement des électrodes	Diminution progressive de la capacité, augmentation de la résistance interne [123]
	Formation de dendrites de lithium	Risque de court-circuit interne, emballement thermique potentiel [124]
Défauts électriques	Anomalies de tension	Altération de l'estimation de l'état de charge (SOC) et de santé (SOH), surtensions [112]
	Court-circuit interne (I_{cc}, R_{cc})	Échauffement rapide, dommages irréversibles de la cellule [125]
Défauts mécaniques	Perforation du séparateur	Fuite d'électrolyte ou de lithium, déclenchement de courts-circuits [126]
	Défaut de connexion inter-cellules	Déséquilibres thermiques et résistifs, baisse de rendement global [127]

Parmi l'ensemble de ces défaillances, les défauts électriques retiennent une attention particulière en raison de leur caractère critique. En effet, les anomalies de tension compromettent directement la précision de l'estimation de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH), fragilisant ainsi la fiabilité du système de gestion de la batterie [112]. De leur côté, les courts-circuits internes constituent l'un des scénarios les plus dangereux, susceptibles d'entraîner un échauffement brutal, un emballement thermique et des dommages irréversibles [125]. Ces deux défauts, à la fois menaçants pour la sécurité et déterminants pour la performance et la longévité de la batterie, justifient pleinement qu'ils soient placés au centre de ce travail. Leur étude approfondie permettra de développer des stratégies robustes de détection et de prévention, adaptées aux exigences croissantes de sûreté et de fiabilité dans les systèmes de stockage électrochimiques modernes.

I.13.1 Anomalies de tension

Les défauts de tension figurent parmi les anomalies électriques les plus fréquemment rencontrées dans les systèmes de gestion des batteries lithium-ion, notamment dans les applications embarquées comme les véhicules électriques.
Ces défauts peuvent avoir plusieurs origines, parmi lesquelles on distingue :

- **Mauvaise répartition de charge** : Certaines cellules peuvent être surchargées tandis que d'autres sont sous-chargées.
- **Effet mémoire** : Peut provoquer des écarts de tension entre les cycles de charge et de décharge.
- **Défaillance des capteurs de tension** : Une mauvaise lecture entraîne une estimation erronée du SOC et du SOH [128].

Cette dernière constitue une source majeure d'erreur dans l'estimation de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH) des batteries, paramètres essentiels au bon fonctionnement du système de gestion de l'énergie (EMS) [125]. Dans un véhicule électrique, les capteurs de tension assurent une surveillance en temps réel des cellules ou modules afin de permettre une régulation précise des cycles de charge et de décharge. Lorsqu'un capteur dysfonctionne soit par dérive, coupure, ou bruit excessif ; la mesure acquise devient incorrecte. Cela induit des décisions erronées dans le système BMS, comme l'arrêt prématuré de la charge, ou au contraire une surcharge dangereuse. Ce type de défaut peut engendrer des **surtensions**, responsables de l'accélération du vieillissement des électrodes et de la formation de dendrites de lithium [124], ou des **sous-tensions** qui limitent les performances de la batterie et altèrent son autonomie.

Ce choix de défaut est particulièrement pertinent pour les applications automobiles, où la précision de la mesure de tension conditionne non seulement les performances du véhicule, mais aussi la sécurité du système.

L'analyse des défauts de capteurs de tension constitue un axe prioritaire pour le développement de stratégies de gestion d'énergie robustes et fiables. L'implémentation de ces défauts dans Simulink permet de concevoir et de valider des observateurs de défaut en conditions simulées proches de la réalité.

I.13.2 Défauts de courts-Circuits internes

Les courts-circuits internes figurent parmi les défauts les plus redoutables affectant les batteries lithium-ion, notamment dans les applications critiques telles que les véhicules électriques. Ils se traduisent par l'apparition d'un courant anormalement élevé à travers la cellule, induit par une résistance interne très faible notée R_{cc}. Ce phénomène provoque une dissipation thermique rapide, pouvant conduire à un emballement thermique, à une dégradation irréversible des matériaux actifs, voire à une explosion [123]. Les origines de ces défauts sont multiples :

- la **formation de dendrites de lithium**, qui traversent le séparateur et provoquent une liaison électrique directe entre l'anode et la cathode, typiquement lors de charges rapides ou prolongées [124],
- la **présence d'impuretés métalliques** dans l'électrolyte ou les électrodes, issue de processus de fabrication défectueux,
- les **contraintes mécaniques** (chocs, vibrations, perforation) pouvant déstabiliser la structure interne de la cellule et déclencher un contact physique entre les électrodes.

Dans notre étude, ce type de défaut a été ciblé en raison de sa sévérité et de la rapidité avec laquelle il peut affecter la sûreté du système. Une modélisation spécifique a été implémentée dans l'environnement **MATLAB/Simulink**, à travers l'intégration d'un *circuit de court-circuit* en parallèle avec le modèle de Thévenin de la batterie. Ce circuit comprend une résistance R_{cc} simulant une liaison directe entre les bornes interne de la cellule. Le courant associé est modélisé par la loi d'Ohm :

$$I_{cc} = \frac{V_{batt}}{R_{cc}}$$

où V_{batt} est la tension instantanée aux bornes de la batterie. Le paramètre R_{cc} est ajustable dynamiquement pour simuler plusieurs niveaux de gravité, allant d'un court-circuit naissant à un défaut brutal.

L'un des principaux défis dans la gestion de ces défauts réside dans leur détection précoce. En effet, dans les phases initiales, le court-circuit peut ne pas produire de symptôme électrique ou thermique suffisamment distinct. Pour y remédier, des travaux récents comme celui de [129, 130] ont proposé une stratégie combinant un modèle de circuit équivalent, un observateur flou de type Takagi-Sugeno, et une détection statistique par la méthode CUSUM. Cette approche permet d'identifier les courts-circuits progressifs avant qu'ils n'atteignent des niveaux critiques, renforçant ainsi la sécurité des systèmes embarqués.

Grâce à la simulation, il devient possible d'évaluer l'impact de tels défauts sur les grandeurs mesurables du système : chute brutale de tension, élévation de température, instabilités dans les flux de puissance. Cela permet de concevoir et tester des observateurs de défauts dans un environnement contrôlé, avant leur déploiement dans les calculateurs embarqués.

En conclusion, la modélisation et la détection des courts-circuits internes sont essentielles pour garantir la fiabilité des systèmes de stockage embarqués. La prise en compte de ces défauts dans la phase de conception du système de gestion d'énergie permet d'anticiper les défaillances graves, tout en améliorant la robustesse globale de l'architecture hybride multi-sources.

I.14 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un état de l'art sur les systèmes hybrides de stockage et de production d'énergie, en mettant en évidence leur importance croissante dans la transition énergétique. L'hybridation énergétique, notamment dans les véhicules électriques et hybrides, repose sur la complémentarité de différentes sources d'énergie telles que les piles à combustible, les batteries et les supercapacités. Chacune de ces technologies présente des avantages et des limites qui nécessitent des stratégies de gestion d'énergie optimisées.

Nous avons également exploré différents modèles de supercondensateurs et de batteries, ainsi que les méthodes existantes de gestion d'énergie. L'efficacité d'un système hybride repose sur une répartition intelligente des flux énergétiques entre les différentes sources en fonction des conditions de charge, de la demande de puissance et de l'état de santé des composants.

Un aspect critique des batteries lithium-ion est leur vulnérabilité aux défauts, qui peuvent affecter leur performance et leur sécurité. Ce chapitre a donc abordé en détail les défauts courants des batteries, en mettant l'accent sur les défauts de tension et les courts-circuits internes.

Chapitre II

Modélisation du Système Hybride

Table de matières

II.1 Introduction 44
II.2 Structure du système hybride 44
II.3 Modélisation des sources 45
II.3.1 Modélisation de la pile à combustible PEMFC 45
II.3.1.1 Principe de fonctionnement 45
II.3.1.2 Modèle électrique équivalent 46
II.3.1.3 Comportement tension-courant d'une pile à combustible 47
II.3.2 Modélisation de supercapacité 48
II.3.2.1 Modèle électrique equivalent d'une supercondensateur 48
II.3.2.2 État de charge (SOC) 49
II.3.3 Modélisation de la batterie 50
II.3.3.1 Dynamique d'une batterie : Modéle de Thévenin 50
II.3.3.2 Représentation d'état d'une batterie 2e ordre 51
II.4 Modélisation des convertisseurs DC/DC 53
II.4.1 Principe de fonctionnement du convertisseur DC/DC unidirectionnel 54
II.4.1.1 Topologie entrelacé flottant à quatre phases 55
II.4.1.2 Modèle moyen du convertisseur FIBC dédié à la pile à combustible . 57
II.4.2 Principe de fonctionnement du convertisseur DC/DC Bidirectionelle 63
II.4.2.1 Topologie entrelacé flottant à quatre phases dédié à la super-capacité 64
II.4.2.2 Topologie entrelacé flottant à quatre phases dédié à la dédie à la Batterie 67
II.4.3 Modélisation petit-signal du convertisseur flottant entrelacé à quatre phases . 69
II.5 Commande des convertisseurs 71
II.5.1 Régulation du courant des sources 72
II.5.2 Régulation de la tension du bus continu 73
II.6 Conclusion 74

III Stratégies de gestion d'énergie et de diagnostic **75**

II.1 Introduction

Dans les systèmes hybrides embarqués, la modélisation des composants est une étape incontournable pour assurer une conception fiable et performante. Elle permet de représenter avec précision le comportement dynamique des différentes sources d'énergie, telles que la pile à combustible, la batterie et la supercapacité, ainsi que des convertisseurs d'électronique de puissance assurant leur interconnexion.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une représentation réaliste et exploitable de ces éléments dans un environnement de simulation et de commande. En prenant en compte les propriétés électriques, dynamiques et structurelles de chaque composant, cette modélisation permet de prévoir les performances du système global, de concevoir des stratégies de gestion d'énergie efficaces, et de préparer leur implémentation temps réel.

La première partie présente la modélisation des trois sources d'énergie. La pile à combustible est décrite par un modèle semi-empirique intégrant les principales pertes électrochimiques, la batterie par un modèle de Thévenin d'ordre deux adapté au suivi du SOC, et la supercapacité par un circuit RC linéaire mettant en évidence sa rapidité de réponse. L'ensemble est exprimé sous forme d'équations différentielles, assurant une intégration cohérente dans les simulateurs temps réel.

La deuxième partie concerne la modélisation des convertisseurs entrelacés flottants à quatre phases, qui assurent l'interface entre les sources et le bus continu. Une modélisation moyenne par phase est réalisée, puis traduite en représentation d'état globale. Un modèle linéarisé en petits signaux est ensuite dérivé pour la préparation de la commande.

Enfin, une stratégie de régulation du courant/tension est développée. Elle repose sur des régulateurs PI : un régulateur par phase pour le courant et un régulateur par deux phases couplées pour la tension. .

II.2 Structure du système hybride

La structure du système étudié repose sur une architecture multi-sources visant à optimiser la gestion énergétique du véhicule tout en répondant aux exigences de performance et de flexibilité. **La Figure II.1** illustre l'organisation générale de ce système, dans lequel les différentes sources d'énergie et les convertisseurs associés sont interconnectés autour d'un bus continu alimentant le moteur de propulsion.

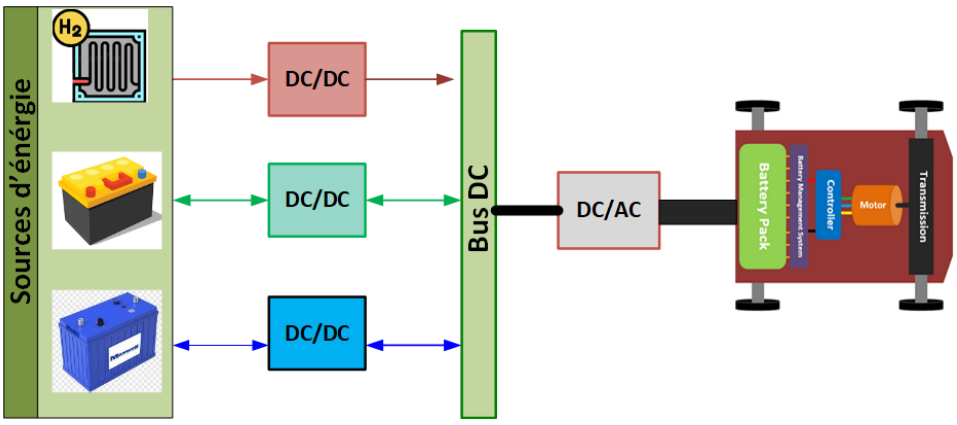


FIGURE II.1 : Structure du système hybride

Comme le montre cette figure, la **pile à combustible**, en tant que source principale unidi-

rectionnelle, fournit une énergie continue avec une bonne densité énergétique. Toutefois, sa faible réactivité aux variations brusques de charge justifie son couplage avec des sources secondaires plus dynamiques [131]. La **batterie** constitue l'une de ces sources : elle assure le stockage et la restitution d'énergie sur des durées prolongées, et se révèle particulièrement efficace lors de la récupération d'énergie [132]. La **supercapacité**, quant à elle, se distingue par sa très haute densité de puissance et ses temps de réponse rapides, ce qui en fait une source idéale pour absorber ou fournir instantanément des pics de puissance, complétant ainsi les limites de la batterie [133].

Du côté de l'électronique de puissance, un **convertisseur DC/DC boost** adapte la tension de la pile à combustible au niveau requis par le **bus continu**, garantissant une intégration fluide de la source principale. Deux **convertisseurs DC/DC bidirectionnels**, associés respectivement à la batterie et à la supercapacité, gèrent les échanges d'énergie bidirectionnels, permettant à ces sources de se charger ou de se décharger en fonction des besoins du système [134]. Le **bus continu** alimente ensuite un **onduleur triphasé**, chargé de convertir la tension continue en tension alternative pour le **moteur de propulsion**. Ce dernier transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, assurant la traction du véhicule, sa performance étant directement liée à l'efficacité de la chaîne de gestion énergétique [135].

L'architecture représentée sur **la Figure II.1** permet une utilisation coordonnée et complémentaire des différentes sources d'énergie. Elle améliore à la fois l'autonomie, la durée de vie des composants et la réactivité du véhicule face aux profils de conduite variables.

II.3 Modélisation des sources

La modélisation des sources d'énergie est essentielle pour représenter leur comportement électrique et dynamique dans un système hybride. Elle permet d'anticiper les interactions entre les composants, d'optimiser la gestion d'énergie et d'assurer la cohérence des simulations avec le fonctionnement réel du système.

II.3.1 Modélisation de la pile à combustible PEMFC

La pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est un convertisseur électrochimique qui permet de produire simultanément de l'électricité, de la chaleur et de l'eau, à partir de l'hydrogène et de l'oxygène. Elle est particulièrement adaptée aux applications embarquées, notamment dans les véhicules électriques hybrides, grâce à sa densité de puissance élevée, son temps de démarrage court et son fonctionnement à basse température [136].

II.3.1.1 Principe de fonctionnement

La structure élémentaire d'une PEMFC est composée d'une anode, d'une cathode et d'une membrane polymère électrolyte. À l'anode, l'hydrogène est oxydé selon la réaction suivante [137] :

$$\mathrm{H_2} \rightarrow 2\mathrm{H^+} + 2e^-, \tag{II.1}$$

Les protons traversent la membrane électrolyte tandis que les électrons sont déviés vers un circuit externe pour générer un courant électrique. À la cathode, l'oxygène réagit avec les protons et les électrons selon la réaction :

$$\frac{1}{2}\mathrm{O_2} + 2\mathrm{H^+} + 2e^- \rightarrow \mathrm{H_2O}. \tag{II.2}$$

La réaction globale d'oxydoréduction est donc donnée par :

$$\mathrm{H_2} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{H_2O} + \text{énergie thermique} + \text{électricité}. \tag{II.3}$$

II.3.1.2 Modèle électrique équivalent

La modélisation électrique d'une pile à combustible repose sur la prise en compte des différentes pertes internes qui affectent la tension de sortie, représentés dans **la figure II.2** :

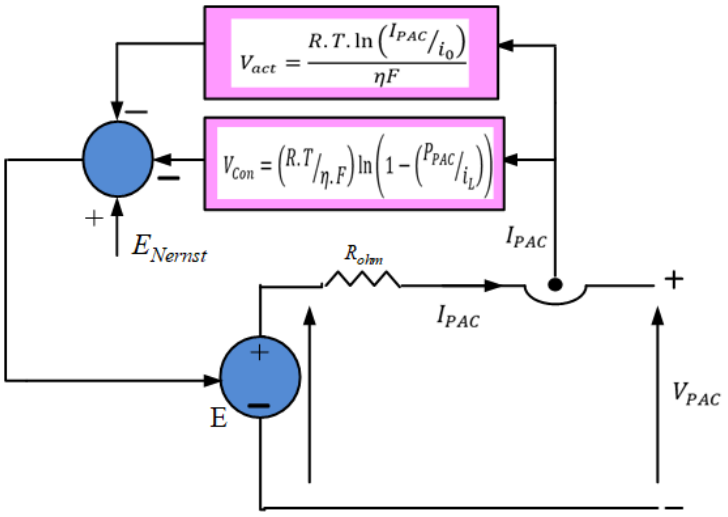


FIGURE II.2 : Modèle électrique équivalent de la pile à combustible PEMFC

La tension réelle V_{pac} est obtenue à partir de la tension théorique à vide E_{Nernst}, en tenant compte des pertes d'activation V_{act}, ohmiques V_{ohm} et de concentration V_{conc} [138, 139] :

$$V_{\text{PAC}} = E_{\text{Nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \tag{II.4}$$

La surtension d'activation, liée aux réactions électrochimiques lentes à l'électrode, est généralement modélisée à l'aide de la loi de Tafel [140] :

$$V_{\text{act}} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln\left(\frac{I_{\text{PAC}}}{i_0}\right) \tag{II.5}$$

où i_0 est la densité de courant d'échange, R la constante universelle des gaz, T la température (en Kelvin), α le coefficient de transfert de charge, F la constante de Faraday, et n le nombre d'électrons transférés.

La perte ohmique, quant à elle, représente la résistance au passage du courant à travers la membrane, les électrodes et les connexions électriques. Elle est modélisée par une loi linéaire [141] :

$$V_{\text{ohm}} = R_{\text{int}} \cdot I_{\text{PAC}} \tag{II.6}$$

où R_{int} est la résistance interne équivalente.

La surtension de concentration reflète les limitations de diffusion massique des réactifs (hydrogène et oxygène) aux électrodes, particulièrement à fort courant [142] :

$$V_{\text{conc}} = -B \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{\text{PAC}}}{I_{\text{lim}}}\right) \tag{II.7}$$

avec I_{lim} le courant limite de diffusion et B un paramètre empirique dépendant des caractéristiques de la pile.

Le potentiel de Nernst E_{Nernst}, représentant la tension idéale de cellule en conditions standards, est exprimé comme suit [140] :

$$E_{\text{Nernst}} = 1.229 - 5 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} \cdot T \cdot \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2})\right] \quad \text{(II.8)}$$

où P_{H_2} et P_{O_2} sont les pressions partielles (en atm) de l'hydrogène et de l'oxygène respectivement.

Ce modèle permet de représenter fidèlement les caractéristiques électriques dynamiques de la pile à combustible et constitue un outil essentiel pour la simulation, la commande, et l'intégration dans des systèmes hybrides multi-sources [143, 144].

II.3.1.3 Comportement tension-courant d'une pile à combustible

En raison de l'affinité chimique entre l'hydrogène et l'oxygène, la pile à combustible génère simultanément de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Cette triple production fait de la pile un véritable tri-générateur, particulièrement adapté aux applications embarquées où les besoins en énergie thermique et électrique coexistent.

Lorsque le courant délivré par la pile à combustible augmente, une relation statique entre la tension de sortie et le courant peut être tracée, connue sous le nom de courbe de polarisation. Cette courbe représente la caractéristique de la pile, et dépend fortement des conditions de fonctionnement. En particulier, la forme générale de la courbe est influencée par des paramètres tels que la température et la pression de fonctionnement, la pureté des gaz réactifs, l'état de distribution du catalyseur, l'hydratation de la membrane polymère ainsi que la structure et l'état des couches de diffusion gazeuse.

La figure II.3 illustre la courbe de polarisation d'une pile à combustible pour trois valeurs différentes de pression d'hydrogène (notées P_1, P_2 et P_3). On y observe que l'augmentation de la pression d'alimentation améliore sensiblement la tension de sortie pour un même niveau de courant, traduisant une amélioration de la cinétique de réaction à l'anode et une réduction des pertes de concentration.

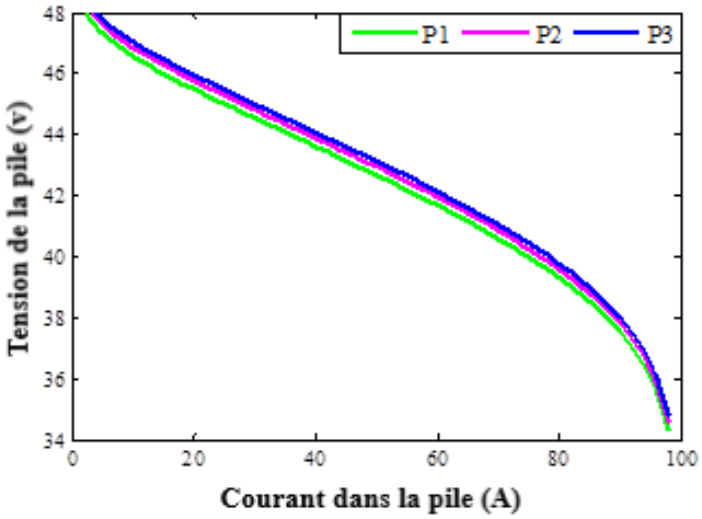


FIGURE II.3 : Caractéristique statique de la pile à combustible pour différentes pressions d'hydrogène

L'analyse de la courbe de polarisation permet d'identifier les différentes zones de fonctionnement de la pile : une zone d'activation à faible courant, dominée par les pertes électrochimiques

; une zone ohmique linéaire où la tension chute proportionnellement au courant ; et enfin une zone de concentration, où la limitation de diffusion des gaz induit une chute rapide de la tension.

Comme démontré dans [145], l'augmentation de la pression d'alimentation en hydrogène permet d'améliorer les performances de la pile en réduisant les pertes de concentration, notamment dans les régimes de forte puissance. Cette variation se traduit par un décalage de la courbe de polarisation vers le haut, indiquant une tension de sortie plus élevée pour un même niveau de courant. L'analyse expérimentale de ces effets permet d'optimiser le dimensionnement de la pile et la stratégie de gestion d'énergie dans une architecture hybride. Cette caractéristique constitue un outil essentiel pour la modélisation précise de la pile, l'optimisation de son point de fonctionnement, ainsi que pour la conception de la stratégie de gestion d'énergie dans un système hybride.

II.3.2 Modélisation de supercapacité

Les supercapacités (ou ultracapacités) sont des dispositifs de stockage électrochimique qui se distinguent par leur très haute densité de puissance, leur rapidité de charge/décharge, et leur longue durée de vie. Elles sont souvent utilisées dans les systèmes hybrides pour répondre aux demandes énergétiques transitoires ou pour récupérer l'énergie lors du freinage régénératif. Afin d'intégrer correctement leur comportement dans une stratégie de gestion d'énergie, un modèle électrique équivalent est généralement adopté [146].

II.3.2.1 Modèle électrique equivalent d'une supercondensateur

Les supercondensateurs, ou condensateurs électrochimiques à double couche (EDLC), sont fréquemment modélisés par des circuits équivalents simples permettant de capturer leur comportement dynamique tout en assurant une complexité de calcul réduite [147, 148]. Le modèle de base considéré dans cette étude est illustré dans **la figure II.4**, il est constitué d'un condensateur idéal C_{SC} associé en série avec une résistance interne R_{SC}, représentant les pertes ohmiques dues aux électrodes, au séparateur et à l'électrolyte.

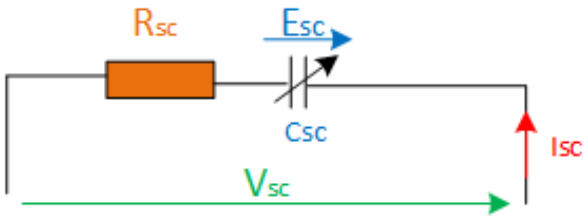


FIGURE II.4 : Représentation schématique du supercondensateur basé sur le modèle de Thévenin d'ordre 1.

La tension aux bornes du supercondensateur $V_{SC}(t)$ peut alors s'écrire comme :

$$V_{SC}(t) = E_{SC}(t) - R_{SC} \cdot I_{SC}(t), \tag{II.9}$$

où :

- $E_{SC}(t)$ est la tension à vide (ou tension interne) du supercondensateur,
- $I_{SC}(t)$ est le courant instantané,
- R_{SC} est la résistance série équivalente (ESR).

En négligeant les pertes résistives pour des raisons d'approximation analytique, la tension interne $E_{SC}(t)$ est directement reliée à la quantité de charge stockée, selon la loi de conservation de la charge :

$$E_{SC}(t) = E_{SC}(0) - \frac{1}{C_{SC}} \int_0^t I_{SC}(\tau)\, d\tau, \tag{II.10}$$

où $E_{SC}(0)$ représente la tension initiale à l'instant $t = 0$.

Cette relation découle de l'équation classique des condensateurs $I = C\frac{dV}{dt}$, inversée ici pour exprimer la tension en fonction de l'historique du courant. Elle permet de modéliser finement l'évolution de la tension dans des applications transitoires, comme le démarrage ou le freinage dans les véhicules hybrides [149].

L'énergie stockée dans le supercondensateur, exprimée en joules, est donnée par :

$$Y_{SC}(t) = \frac{1}{2} C_{SC} \cdot E_{SC}^2(t), \tag{II.11}$$

et l'état de charge, $SOC_{SC}(t)$, est défini comme le rapport entre l'énergie instantanée et l'énergie maximale (obtenue à la tension $E_{SC,\max}$) :

$$SOC_{SC}(t) = \frac{Y_{SC}(t)}{\frac{1}{2} C_{SC} \cdot E_{SC,\max}^2}. \tag{II.12}$$

Ce modèle, bien que simplifié, reste largement adopté dans les stratégies de gestion d'énergie embarquées, en raison de sa précision suffisante pour simuler les cycles charge/décharge rapides caractéristiques des supercondensateurs [150, 151].

Le modèle classique de supercapacité est basé sur un circuit RC, Ce modèle permet de reproduire le comportement dynamique de la tension de la batterie, en tenant compte de l'évolution du courant et de l'état de charge (SoC). Le modèle le plus utilisé est le suivant :

$$V_{SC}(t) = V_0 - \frac{1}{C_{SC}} \int_0^t i(t)dt - R_{SC} \cdot i(t) \tag{II.13}$$

où :

- $V_{SC}(t)$ est la tension aux bornes de la supercapacité,
- V_0 est la tension initiale,
- C_{SC} est la capacité (en Farads),
- R_{SC} est la résistance série équivalente (ESR),
- $i(t)$ est le courant traversant la supercapacité.

Ce modèle linéaire permet de capter l'essentiel du comportement dynamique pour des applications de simulation rapide et en temps réel. Toutefois, pour des modélisations plus précises, certains auteurs introduisent des éléments non linéaires comme une capacité variable avec la tension ou une dépendance thermique [152].

II.3.2.2 État de charge (SOC)

L'état de charge d'une supercapacité correspond au rapport entre la quantité de charge électrique emmagasinée à un instant donné et sa capacité maximale de stockage :

$$SOC_{SC}(t) = \frac{C_{SC} \cdot V_{SC}(t)}{C_{SC} \cdot V_{\max}} = \frac{V_{SC}(t)}{V_{\max}} \tag{II.14}$$

Ce rapport linéaire est l'un des avantages majeurs des supercapacités par rapport aux batteries, dont le SOC dépend de manière non linéaire de la tension et du courant.

Pour les applications embarquées, ce modèle de supercapacité est souvent intégré dans une chaîne de conversion DC/DC bidirectionnelle, permettant à la fois la charge et la décharge selon les besoins du système. Il est également utilisé dans des stratégies de gestion énergétique multi-sources pour optimiser l'usage combiné batterie/supercapacité [153].

II.3.3 Modélisation de la batterie

Le modèle équivalent de Thévenin d'ordre deux est largement reconnu pour sa capacité à représenter avec précision le comportement dynamique des batteries lithium-ion, notamment en ce qui concerne la tension terminale et l'évolution de l'état de charge (SOC). Ce type de modèle est particulièrement pertinent pour les applications embarquées, où un compromis entre fidélité de modélisation et complexité computationnelle est requis, comme dans les systèmes de gestion d'énergie ou les algorithmes de diagnostic embarqué. La structure du modèle repose sur un vecteur d'état intégrant deux tensions de polarisation V_{RC1} et V_{RC2}, associées à des réseaux RC parallèles, l'état de charge SOC, ainsi que la tension de la batterie V_{bat}. La sortie du système se limite aux grandeurs mesurables que sont V_{bat} et SOC, ce qui facilite son intégration dans les observateurs temps réel [154]. Le circuit équivalent représenté par la figure ci-dessous comprend :

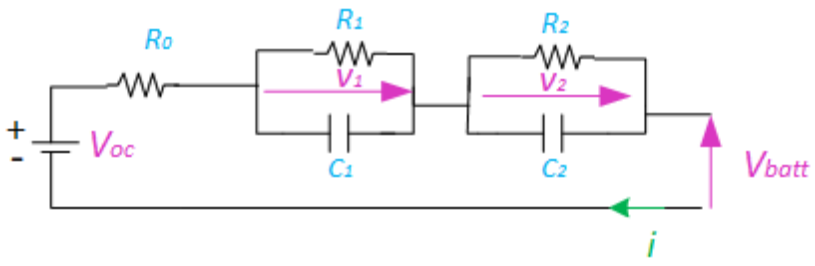


FIGURE II.5 : Modèle de Thévenin 2e ordre d'une batterie.

- Une tension en circuit ouvert $V_{OC}(SOC)$, fonction non linéaire du SOC
- Une résistance interne R_0 représentant les pertes ohmiques instantanées
- Deux branches RC notées (R_1, C_1) et (R_2, C_2), modélisant les effets dynamiques rapides et lents.

La tension de la batterie s'exprime par :

$$V_{\text{batt}}(t) = V_{OC}(SOC) - R_0 \cdot i(t) - V_{RC1}(t) - V_{RC2}(t) \tag{II.15}$$

II.3.3.1 Dynamique d'une batterie : Modéle de Thévenin

La dynamique des tensions aux bornes des branches RC est modélisée par deux équations différentielles :

$$\frac{dV_{RC1}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} V_{RC1}(t) + \frac{1}{C_1} i(t) \tag{II.16}$$

$$\frac{dV_{RC2}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_2C_2}V_{RC2}(t) + \frac{1}{C_2}i(t) \tag{II.17}$$

- $i(t)$: courant batterie (positif en décharge)
- $V_{\mathrm{OC}}(SOC)$: tension en circuit ouvert, fonction non linéaire du SOC
- R_0 : résistance ohmique
- (R_1, C_1) et (R_2, C_2) : composants des branches dynamiques RC
- η : rendement coulombique
- C_n : capacité nominale

Le modèle équivalent de Thévenin à second ordre permet de décrire le comportement dynamique d'une batterie lithium-ion en prenant en compte les effets transitoires à travers deux branches RC. La tension aux bornes de la batterie s'exprime comme suit :

$$V_{\mathrm{batt}} = V_{\mathrm{oc}} - R_0 I - V_1 - V_2 \tag{II.18}$$

avec une relation linéarisée entre la tension à vide et l'état de charge :

$$V_{\mathrm{oc}} = K_0 + K_1 \cdot SOC \tag{II.19}$$

Les dynamiques internes des deux branches RC sont données par :

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1C_1}V_1 + \frac{I}{C_1} \tag{II.20}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2C_2}V_2 + \frac{I}{C_2} \tag{II.21}$$

L'évolution de l'état de charge est décrite par :

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{I}{C_n} \tag{II.22}$$

En dérivant l'équation de la tension batterie, on obtient :

$$\frac{dV_{\mathrm{batt}}}{dt} = K_1 \cdot \frac{dSOC}{dt} - \frac{dV_1}{dt} - \frac{dV_2}{dt} \qquad = -\frac{K_1}{C_n}I + \frac{V_1}{R_1C_1} - \frac{I}{C_1} + \frac{V_2}{R_2C_2} - \frac{I}{C_2} \tag{II.23}$$

II.3.3.2 Représentation d'état d'une batterie 2e ordre

Afin de faciliter l'analyse et la conception d'observateurs, il est courant de réécrire le modèle de Thévenin d'ordre deux sous une forme d'état. Cette formulation permet de représenter de manière compacte l'évolution des variables internes et leur interaction avec les entrées et sorties du système [154].
On considère le vecteur d'état :

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V_{\mathrm{batt}}(t) \\ SOC(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = I(t), \quad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} V_{\mathrm{batt}}(t) \\ SOC(t) \end{bmatrix}$$

(II.24)

Les équations dynamiques s'écrivent :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{f} \tag{II.25}$$

avec :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & a_1 K_1 & a_3 & a_4 \\ -a_2 & a_2 K_1 & -a_2 & -a_2 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} -a_1 K_0 \\ a_2 K_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

Équations de sortie du système

La sortie comprend la tension batterie et l'état de charge :

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} V_{\text{batt}}(t) \\ SOC(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \cdot \mathbf{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{u}(t) \tag{II.27}$$

Définition des constantes

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \\ a_2 &= \frac{1}{R_t C_n} \\ a_3 &= \frac{1}{R_2 C_2} \\ a_4 &= \frac{1}{R_1 C_1} \\ b_1 &= \frac{K_1}{C_n} + \frac{R_0}{R_1 C_1} + \frac{R_0}{R_2 C_2} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \\ b_2 &= \frac{1}{C_1} \\ b_3 &= \frac{1}{C_2} \end{aligned} \tag{II.28}$$

Le système est exprimé sous forme d'état comme suit :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t) + \mathbf{f}, \quad \mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot u(t) \tag{II.29}$$

avec :

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V_{\text{batt}}(t) \\ SOC(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = I(t), \quad \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} V_{\text{batt}}(t) \\ SOC(t) \end{bmatrix} \tag{II.30}$$

Les matrices du système sont données par :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_2}\right) & K_1\left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_2}\right) & \frac{1}{R_2C_2} & \frac{1}{R_1C_1} \\ -\frac{1}{R_tC_n} & \frac{K_1}{R_tC_n} & -\frac{1}{R_tC_n} & -\frac{1}{R_tC_n} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_1C_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_2C_2} \end{bmatrix} \tag{II.31}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{C_n} + \frac{R_0}{R_1C_1} + \frac{R_0}{R_2C_2} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \\ 0 \\ \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \end{bmatrix} \tag{II.32}$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} -K_0\left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_2C_2}\right) \\ \frac{K_0}{R_tC_n} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{II.33}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{II.34}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{II.35}$$

II.4 Modélisation des convertisseurs DC/DC

La modélisation des conversions d'énergie constitue une étape essentielle pour le développement et l'optimisation des stratégies de commande dans les systèmes hybrides multi-sources. Elle permet de représenter, de manière rigoureuse, le transfert de puissance entre les sources (pile à combustible, batterie, supercapacité) et les charges via des convertisseurs statiques [15, 155].

Dans une première phase, la modélisation du convertisseur entrelacé flottant à quatre phases est conduite à partir d'une approche moyennée en temps, communément appelée *modélisation en signaux moyens*. Cette technique consiste à lisser les grandeurs électriques sur une période de commutation, ce qui permet de négliger les effets haute fréquence dus à la commutation des interrupteurs tout en conservant les dynamiques lentes pertinentes du système. Un tel modèle, exprimé sous forme d'équations différentielles continues, est particulièrement adapté à la simulation sous MATLAB/Simulink [72].

Ce modèle en signaux moyens permet de prédire efficacement le comportement transitoire et stationnaire du convertisseur, tout en réduisant significativement la complexité de l'analyse. Il offre un compromis pertinent entre fidélité physique et efficacité de simulation, notamment dans le cadre du dimensionnement énergétique et de la validation des lois de gestion de puissance.

Dans un convertisseur DC/DC entrelacé flottant à quatre phases [156], une stratégie de régulation hiérarchisée est nécessaire pour garantir à la fois la stabilité dynamique, le partage équilibré du courant entre les phases, et une régulation précise de la tension de sortie. Cette commande repose sur deux boucles de régulation imbriquées, chacune fondée sur un régulateur proportionnel-intégral (PI), adapté à la nature de la grandeur régulée. Cependant, pour étudier la dynamique du système autour d'un point de fonctionnement et concevoir des régulateurs de type PI, une linéarisation locale devient nécessaire. Cette étape sera introduite ultérieurement dans ce manuscrit. Elle repose sur la modélisation en petits signaux, dans laquelle chaque grandeur est

exprimée comme la somme d'une composante moyenne et d'une perturbation de faible amplitude notée en tilde (e.g., $\tilde{V}(t)$, $\tilde{I}(t)$, $\tilde{d}$).
Cette représentation est indispensable pour l'analyse fréquentielle, la synthèse du régulateur PI, et l'étude de la stabilité du système linéarisé.
Notre architecture hybride emploie trois convertisseurs entrelacés à quatre phases :

- Un **convertisseur unidirectionnel** associé à la pile à combustible,
- Deux **convertisseurs bidirectionnels** connectés respectivement à la batterie et à la supercapacité.

La conception d'une stratégie de commande efficace pour un convertisseur entrelacé flottant repose sur une démarche structurée en plusieurs étapes successives :

1. **Sélection de la topologie du convertisseur** : choix d'un convertisseur entrelacé flottant à quatre phases pour sa capacité à réduire les ondulations, améliorer la répartition thermique et optimiser le rendement global.
2. **Élaboration du modèle dynamique moyen** : application de la méthode de moyennage sur une période de commutation pour obtenir un modèle continu décrivant les dynamiques lentes du convertisseur. Ce modèle permet d'évaluer le comportement global sans les effets de commutation rapides.
3. **Linéarisation en petits signaux autour d'un point de fonctionnement** : décomposition de chaque variable (tension, courant, rapport cyclique) en une composante moyenne et une perturbation, pour obtenir un modèle linéaire à coefficients constants.
4. **Conception de la boucle interne de courant** : synthèse d'un régulateur PI pour chaque phase, permettant de contrôler finement le courant traversant les inductances, en assurant rapidité, stabilité et partage équitable.
5. **Conception de la boucle externe de tension** : élaboration d'un second régulateur PI à action plus lente, destiné à maintenir la tension du bus DC à sa consigne en ajustant le point de fonctionnement de la boucle de courant.

Chaque étape s'appuie sur une modélisation rigoureuse et une approche systématique, assurant à la fois la robustesse et la stabilité du système hybride embarqué.

II.4.1 Principe de fonctionnement du convertisseur DC/DC unidirectionnel

Le convertisseur DC/DC unidirectionnel est un dispositif de conversion statique permettant de transférer l'énergie électrique d'une source continue vers une charge ou un bus DC, tout en modifiant la tension selon les besoins de l'application. Ce type de convertisseur fonctionne dans un seul sens du flux de puissance, typiquement de la source (comme une pile à combustible) vers le bus de distribution.

Dans notre cas son fonctionnement en mode boost, l'interrupteur principal est commandé de manière à accumuler l'énergie dans une inductance pendant la phase de conduction, puis à la transférer vers le condensateur de sortie lors de l'ouverture du commutateur. Ce transfert se fait via une diode qui empêche le retour de courant.

Le fonctionnement repose sur des séquences périodiques de commutation, modulées par un signal PWM (Pulse Width Modulation). La largeur d'impulsion détermine le rapport cyclique

d, qui contrôle directement la tension de sortie selon la relation :

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{1-d} \quad \text{(en mode boost, idéal)}$$

Ce mode de commande permet une régulation rapide et précise de la tension de sortie, tout en assurant une adaptation dynamique aux variations de charge.

II.4.1.1 Topologie entrelacé flottant à quatre phases

Le convertisseur DC/DC entrelacé flottant à quatre phases est retenu ici comme interface entre la pile à combustible, source unidirectionnelle à dynamique lente, et le bus continu du système hybride multi-sources. Ce choix repose sur une combinaison d'arguments structurels, fonctionnels et dynamiques, qui le rendent particulièrement adapté aux exigences de stabilité, de rendement et de compatibilité électromagnétique dans les applications embarquées [157].

La structure détaillée de ce convertisseur est illustrée à **la Figure II.6**.

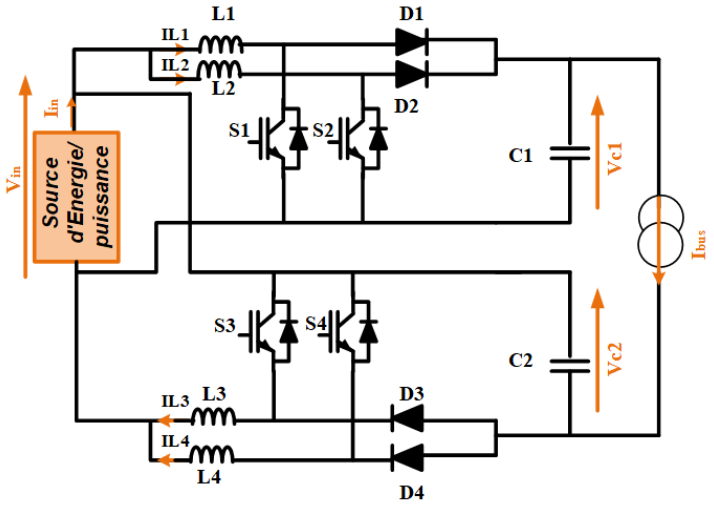


FIGURE II.6 : Convertisseur DC/DC entrelacé flottant à 4 phases.

Chaque phase comprend un interrupteur de type MOSFET, une diode de roue libre ainsi qu'un inducteur, L_i et d'un condensateur de sortie C. Le convertisseur DC/DC retenu dans cette architecture repose sur une topologie entrelacée à quatre phases, dite *flottante*. Il s'agit d'un convertisseur élévateur (boost) commandé en modulation de largeur d'impulsion (PWM), dans lequel les quatre phases sont pilotées de manière décalée afin d'optimiser les performances dynamiques et la qualité du courant de sortie. Le qualificatif « flottant » provient du fait que la masse de la pile à combustible n'est pas reliée directement à celle du bus continu. Cette configuration offre davantage de flexibilité dans l'isolation galvanique, notamment dans les systèmes multi-sources, et permet une intégration plus sûre vis-à-vis des contraintes haute tension.

Chaque cellule de conversion est composée d'un interrupteur MOSFET S_i et d'une diode de roue libre D_i ($i \in \{1,2,3,4\}$), associés à une inductance L_i et un condensateur de découplage. Les quatre branches fonctionnent selon le même principe, mais avec un déphasage temporel progressif de $T_s/4$ entre les signaux de commande. Les grandeurs T_s et d correspondent respectivement à la période de commutation et au rapport cyclique PWM. Ce déphasage permet une répartition homogène des instants de commutation sur toute la période, réduisant ainsi la densité spectrale des harmoniques [158].

L'architecture entrelacée à quatre phases repose sur l'utilisation de plusieurs canaux de conversion opérant avec un décalage temporel entre leurs signaux de commande, comme représenté à **la figure II.7**.

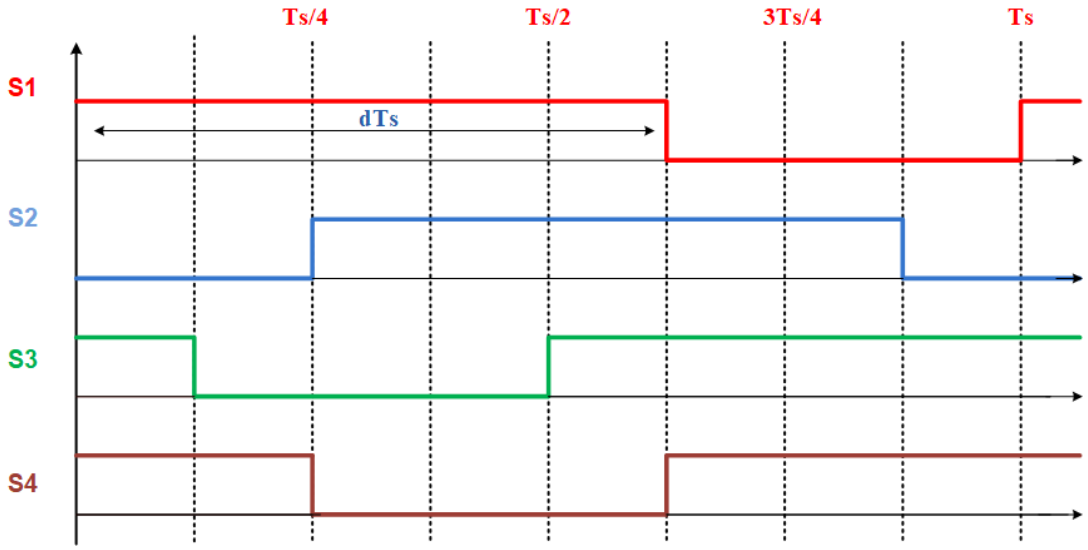


FIGURE II.7 : Signaux de commande déphasés des quatre interrupteurs du convertisseur entrelacé sur une période T_s

Chaque interrupteur S_i est activé avec un déphasage de $\frac{T_s}{4}$ par rapport au précédent, ce qui répartit uniformément les instants de commutation sur toute la période de découpage T_s. Cette stratégie a pour effet de réduire considérablement les pics de courant et d'atténuer les variations rapides du courant global injecté dans le bus.

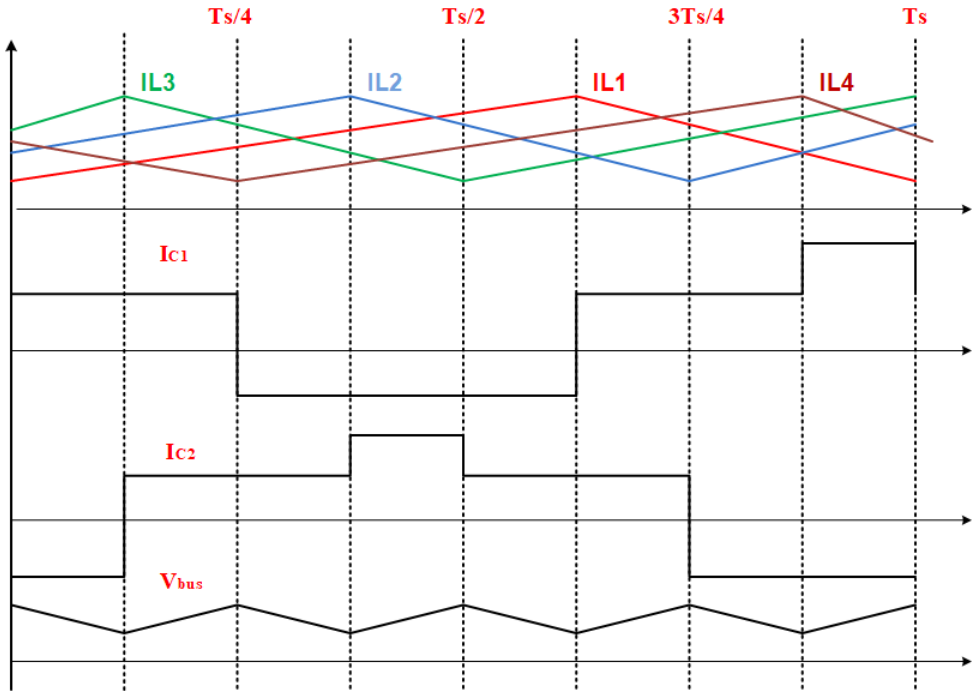


FIGURE II.8 : Évolution temporelle des courants d'inductances, des courants de condensateurs et de la tension du bus dans un convertisseur entrelacé à 4 phases

La figure II.8 illustre les effets dynamiques de ce fonctionnement coordonné. On observe

que les courants des inductances (IL_1 à IL_4) sont déphasés, mais présentent chacun un profil en dents de scie typique du fonctionnement PWM. Leur superposition temporelle génère un courant total plus lisse, ce qui réduit significativement l'ondulation de la tension V_{bus} et améliore la stabilité du système. Par ailleurs, les courants des condensateurs (I_{C1} et I_{C2}) montrent une contribution équilibrée à la régulation de la tension de sortie.

Outre la réduction des ondulations, l'entrelacement présente plusieurs avantages techniques majeurs :

- Réduction des pertes par commutation grâce à la diminution du taux de commutation par interrupteur.
- Amélioration de la dissipation thermique par la répartition des pertes entre phases.
- Atténuation des interférences électromagnétiques (EMI) liées à la régularisation des fronts de commutation.
- Augmentation de la fréquence équivalente de sortie sans augmentation de la fréquence de découpage individuelle.

Ces bénéfices font du convertisseur entrelacé une solution de choix pour l'interface DC/DC de la pile à combustible dans un système hybride, notamment en ce qui concerne la réduction de l'ondulation du courant et l'amélioration de la longévité des composants passifs et semi-conducteurs.

Des études récentes comme celles de Delarue [159] et Zhang et al. [15] confirment les avantages structurels et dynamiques des topologies multiphases pour les applications embarquées, notamment en termes d'efficacité énergétique et de compacité.

Les signaux de commande appliqués aux interrupteurs S_i sont récapitulés dans le tableau II.1. Dans ce scénario, l'énergie est transférée de la pile à combustible vers la charge à travers l'activation coordonnée des quatre MOSFET et des diodes associées, assurant ainsi la conversion et le transfert efficace de puissance.

Tableau II.1 : Signaux de commande des interrupteurs sur un cycle T

	$I_1 = t_0{-}t_1$	$I_2 = t_1{-}t_2$	$I_3 = t_2{-}t_3$	$I_4 = t_3{-}t_4$	$I_5 = t_4{-}t_5$	$I_6 = t_5{-}t_6$	$I_7 = t_6{-}t_7$	$I_8 = t_7{-}t_8$
S_1	1	1	1	1	1	0	0	0
S_2	0	0	1	1	1	1	1	0
S_3	1	0	0	1	1	1	1	1
S_4	1	1	1	0	0	1	1	1

Le convertisseur entrelacé flottant présente plusieurs avantages majeurs pour une application à pile à combustible : il limite les variations rapides de courant, ce qui contribue à la préservation de la membrane d'échange protonique (MEP) et à l'allongement de la durée de vie du générateur électrochimique. En outre, il réduit les contraintes thermiques sur les interrupteurs, améliore la densité de puissance et assure une régulation plus souple du point de fonctionnement de la PAC. Grâce à sa structure entrelacée, il permet également une miniaturisation des composants de filtrage, essentielle pour les systèmes embarqués ou mobiles [159].

II.4.1.2 Modèle moyen du convertisseur FIBC dédié à la pile à combustible

Afin d'assurer une interface efficace entre la pile à combustible et le bus continu du système hybride, le convertisseur DC/DC de type entrelacé flottant à quatre phases, ou *Floating Interleaved Boost Converter* (FIBC), est adopté [145]. La structure détaillée de ce convertisseur est

illustrée à **la Figure II.9**, qui met en évidence la disposition des quatre cellules de conversion et la logique d'entrelacement appliquée aux signaux de commande.

La structure détaillée de ce convertisseur est illustrée à **la Figure II.9**.

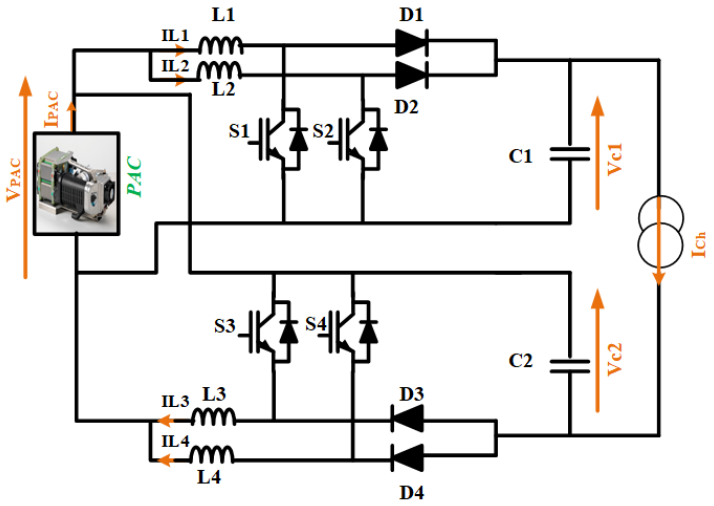


FIGURE II.9 : Convertisseur DC/DC entrelacé flottant à 4 phases dédié a la PAC.

Afin de déterminer le modèle moyen de ce convertisseur, nous avons sélectionné les variables d'état suivantes :

- les tensions aux bornes des condensateurs : V_{C1} et V_{C2},
- les courants dans les inductances : I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} et I_{L4}.

En parallèle, les variables de commande choisies sont :

- La tension à la sortie de la pile à combustible : V_{PAC}
- La variable de sortie la tension du bus continu, notée V_{Bus} et le courant à travers la charge (I_{ch}).

La représentation du système dans l'espace d'état est donnée par :

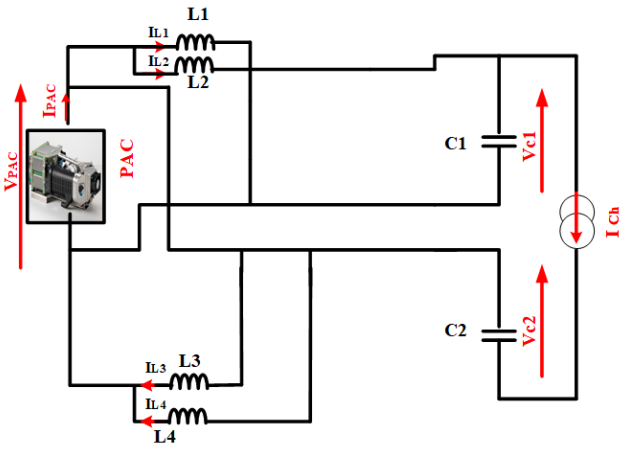
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \tag{II.36}$$

Avec :

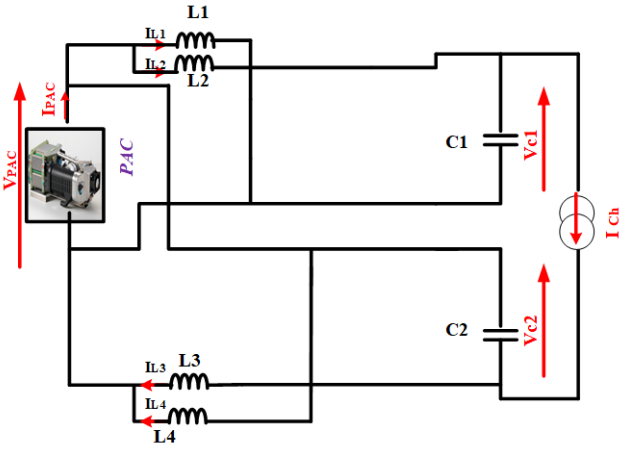
$$\begin{cases} x = [I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}, I_{L4}, V_{C1}, V_{C2}]^T \\ y = [V_{PAC}, I_{\text{Ch}}]^T \\ u = V_{\text{bus}}(t) \end{cases} \tag{II.37}$$

Les séquences de commande appliquées aux interrupteurs S_i sont résumées dans le tableau II.1.

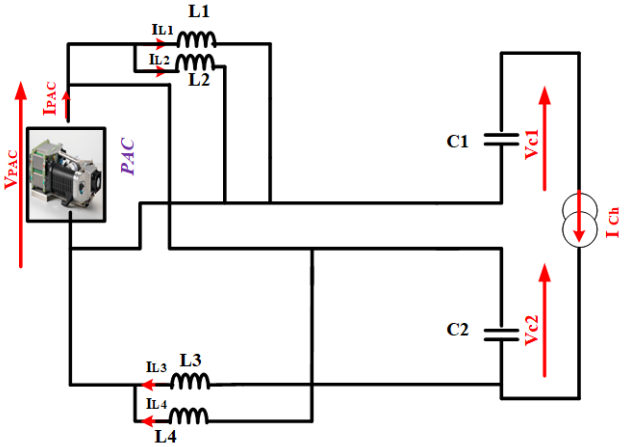
Dans cette configuration de fonctionnement, le transfert d'énergie s'effectue depuis la pile à combustible vers la charge, via les quatre transistors MOSFET et les quatre diodes intégrées au convertisseur.



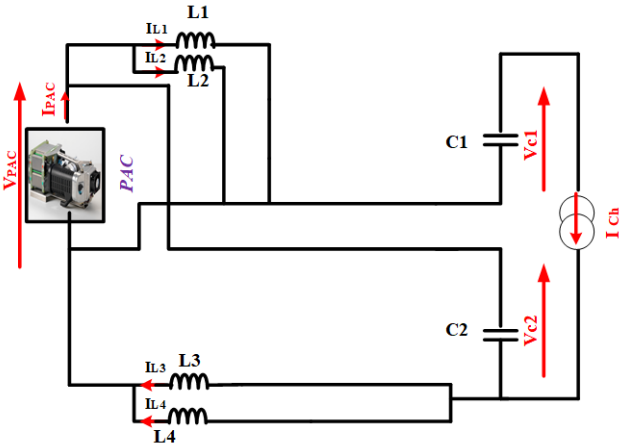
(a) Intervalle 1



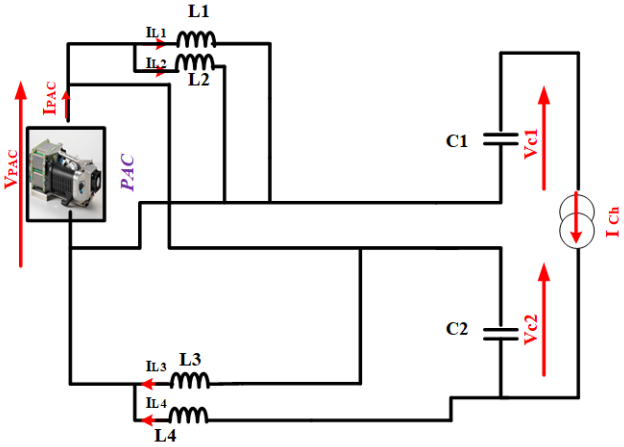
(b) Intervalle 2



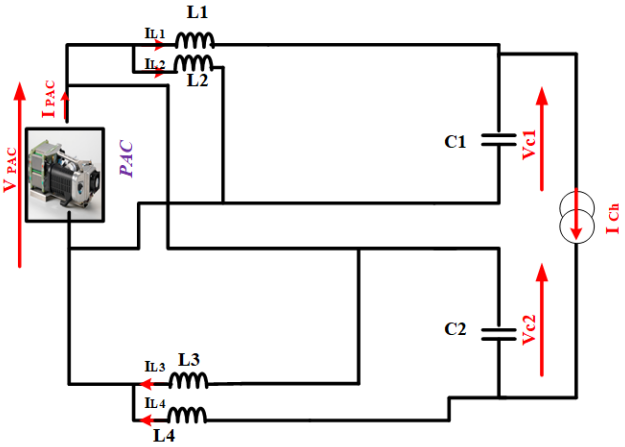
(c) Intervalle 3



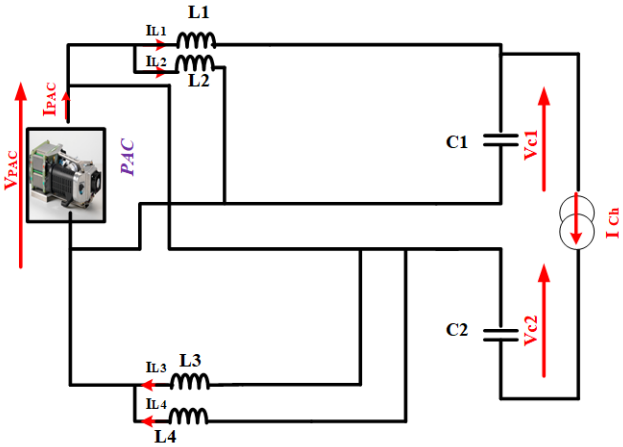
(d) Intervalle 4



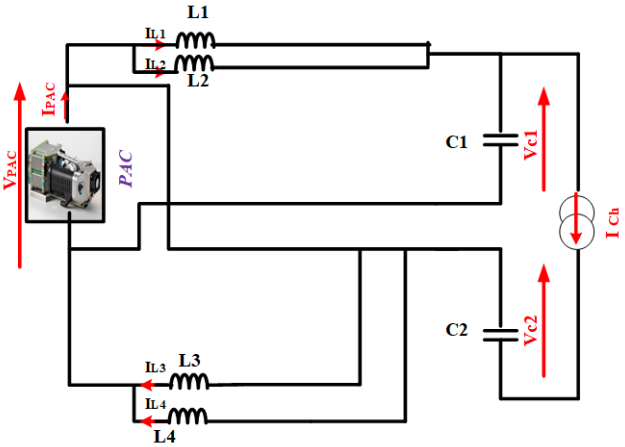
(e) Intervalle 5



(f) Intervalle 6



(g) Intervalle 7



(h) Intervalle 8

FIGURE II.10 : Circuits équivalents du convertisseur DC/DC pour les 8 intervalles de fonctionnement

Les différents états de conduction correspondant à ces signaux de commande sont modélisés par les circuits équivalents représentés dans **la figure II.10**, illustrant les phases successives du fonctionnement entrelacé.

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C1}) - \frac{r_d}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L2} - I_{\text{Ch}}) \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = -\frac{1}{C}I_{\text{Ch}} \end{cases}$$

(a) Intervalle 1

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C1}) - \frac{r_d}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C2}) - \frac{r_d}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L2} - I_{\text{Ch}}) \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L3} - I_{\text{Ch}}) \end{cases}$$

(b) Intervalle 2

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C2}) - \frac{r_d}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{1}{C}I_{\text{Ch}} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L3} - I_{\text{Ch}}) \end{cases}$$

(c) Intervalle 3

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C2}) - \frac{r_d}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C2}) - \frac{r_d}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{1}{C}I_{\text{Ch}} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L3} + I_{L4} - I_{\text{Ch}}) \end{cases}$$

(d) Intervalle 4

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C2}) - \frac{r_d}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{1}{C}I_{\text{Ch}} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L4} - I_{\text{Ch}}) \end{cases}$$

(e) Intervalle 5

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C1}) - \frac{r_d}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C2}) - \frac{r_d}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L1} - I_{\text{Ch}}) \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L4} - I_{\text{Ch}}) \end{cases}$$

(f) Intervalle 6

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C1}) - \frac{r_d}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L1} - I_{\text{Ch}}) \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = -\frac{1}{C}I_{\text{Ch}} \end{cases}$$

(g) Intervalle 7

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{\text{PAC}} - V_{C1}) - \frac{r_d}{L}I_{L1} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L2} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L3} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{1}{L}V_{\text{PAC}} - \frac{r_t}{L}I_{L4} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{L1} + I_{L2} - I_{\text{Ch}}) \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = -\frac{1}{C}I_{\text{Ch}} \end{cases}$$

(h) Intervalle 8

Les équations relatives au convertisseur FIBC sont données pour les différentes séquences de fonctionnement (voir **Figure II.10**). Les formulations matricielles dépendant du paramètre I_{ch} sont exposées ci-après.

$$A_1 = \begin{pmatrix} -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A_2 = \begin{pmatrix} -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A_4 = \begin{pmatrix} -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_5 = \begin{pmatrix} -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \quad A_6 = \begin{pmatrix} -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_7 = \begin{pmatrix} -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \quad A_8 = \begin{pmatrix} -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{r_d}{L} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r_t}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = B_5 = B_6 = B_7 = B_8 = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{C} \end{pmatrix} \tag{II.38}$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = C_7 = C_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{II.39}$$

Finalement, le modèle moyen du convertisseur, obtenu par moyennage sur une période d'échantillonnage T, peut être représenté par le système d'équations suivant :

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{pmatrix}, \qquad x = \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{pmatrix} \tag{II.40}$$

$$A = \left(d - \frac{1}{2}\right)(A_1 + A_3 + A_5 + A_7) + \left(\frac{3}{4} - d\right)(A_2 + A_4 + A_6 + A_8) \tag{II.41}$$

$$B = B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = B_5 = B_6 = B_7 = B_8 \tag{II.42}$$

$$C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = C_7 = C_8 \tag{II.43}$$

En remplaçant $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7$ et B_8, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ et C_8, et $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ et A_8.

La matrice globale est présentée dans l'équation (II.44)

$$\begin{pmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r_d(1-d)-dr_t}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{d-1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{r_d(1-d)-dr_t}{L} & 0 & 0 & \frac{d-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_d(1-d)-dr_t}{L} & 0 & 0 & \frac{d-1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{r_d(1-d)-dr_t}{L} & 0 & \frac{d-1}{L} \\ \frac{1-d}{C} & \frac{1-d}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-d}{C} & \frac{1-d}{C} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{\text{PAC}} \\ I_{\text{ch}} \end{pmatrix} \tag{II.44}$$

Les équations dépendant du courant I_{ch} sont présentées ci-après.

$$\begin{cases} \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{r_d(d-1)-dr_t}{L} I_{L1} + \frac{d-1}{L} V_{C1} + \frac{1}{L} V_{PAC} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{r_d(d-1)-dr_t}{L} I_{L2} + \frac{d-1}{L} V_{C1} + \frac{1}{L} V_{PAC} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} = \frac{r_d(d-1)-dr_t}{L} I_{L3} + \frac{d-1}{L} V_{C2} + \frac{1}{L} V_{PAC} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} = \frac{r_d(d-1)-dr_t}{L} I_{L4} + \frac{d-1}{L} V_{C2} + \frac{1}{L} V_{PAC} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{1-d}{C} I_{L1} + \frac{1-d}{C} I_{L2} - \frac{I_{\text{ch}}}{C} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{1-d}{C} I_{L3} + \frac{1-d}{C} I_{L4} - \frac{I_{\text{ch}}}{C} \end{cases} \tag{II.45}$$

Dans le cadre de la modélisation simplifiée du convertisseur, nous adoptons l'hypothèse selon laquelle les pertes par conduction et les effets de commutation sont négligeables. Ainsi, les résistances de conduction r_d et de transition r_t sont considérées nulles.

II.4.2 Principe de fonctionnement du convertisseur DC/DC Bidirectionelle

Contrairement au convertisseur unidirectionnel utilisé pour l'interface avec la pile à combustible, les convertisseurs associés à la batterie et à la supercapacité sont de type bidirectionnel. Cette différence se manifeste essentiellement dans la capacité à inverser le sens du flux de courant, permettant à ces convertisseurs de fonctionner aussi bien en mode décharge (de la source vers le bus DC) qu'en mode charge (du bus vers la source).

Dans le cas du convertisseur unidirectionnel, le courant circule uniquement de la source (pile à combustible) vers la charge, ce qui simplifie la structure de commande mais limite la flexibilité énergétique du système. À l'inverse, les convertisseurs bidirectionnels permettent une gestion énergétique plus dynamique, notamment pour assurer la récupération d'énergie, la stabilisation du bus ou encore l'assistance transitoire à la pile.

Son principe de fonctionnement repose également sur des séquences de commutation périodiques, commandées par une modulation en largeur d'impulsion (PWM). Le rapport cyclique d

joue un rôle central dans la commande, en déterminant la tension de conversion selon la direction du transfert énergétique.

En mode **buck** (décharge de la source vers le bus), la relation idéale entre tension d'entrée V_{in} et tension de sortie V_{out} est donnée par :

$$V_{\text{out}} = d \cdot V_{\text{in}} \quad \text{(en mode buck, idéal)}$$

Inversement, en mode **boost** (recharge de la source), la relation devient :

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{1-d} \quad \text{(en mode boost, idéal)}$$

Ces deux régimes s'enchaînent dynamiquement selon les besoins de puissance du système et l'état de charge de la source. Le choix des composants (MOSFETs bidirectionnels, diodes rapides, inductances optimisées) permet d'assurer un rendement élevé dans les deux sens de fonctionnement, tout en garantissant une commande efficace et symétrique.

Dans ce qui suit, la modélisation dynamique des deux convertisseurs bidirectionnels utilisés pour la batterie et la supercapacité sera détaillée, en tenant compte de leur capacité à fonctionner dans les deux sens du courant.

II.4.2.1 Topologie entrelacé flottant à quatre phases dédié à la super-capacité

Le convertisseur bidirectionnel connecté à la supercapacité assure la gestion du flux d'énergie entre le stockage à haute densité de puissance et le bus continu. Grâce à sa capacité à faire circuler le courant dans les deux sens, il peut fonctionner en mode décharge (boost) ou en mode charge (buck), selon les besoins instantanés du système.

En mode **décharge**, lorsque la tension du bus est inférieure à celle requise ou en cas de demande énergétique transitoire élevée, la supercapacité injecte de l'énergie dans le bus DC. Le convertisseur fonctionne alors en mode boost : l'énergie est transférée de la supercapacité vers la charge via une élévation de tension contrôlée.

En mode **charge**, lorsque l'excès d'énergie est disponible sur le bus (par exemple lors de phases de freinage ou de faible consommation), le convertisseur inverse le sens du courant. Il fonctionne alors en mode buck, permettant de recharger la supercapacité de manière contrôlée à partir du bus DC, tout en limitant les surintensités.

La réversibilité du courant est assurée par l'utilisation de deux interrupteurs actifs par phase, permettant un contrôle fin de la polarité et de l'amplitude du courant, en garantissant une adaptation rapide à la dynamique du système. Ce principe de fonctionnement est particulièrement adapté aux supercapacités, qui se caractérisent par une forte puissance instantanée, une excellente cyclabilité, mais une capacité énergétique limitée. Le convertisseur bidirectionnel permet ainsi d'exploiter efficacement ces propriétés pour améliorer la réponse transitoire globale du système hybride.

II.4.2.1.a Modèle moyen du convertisseur FIBC

La modélisation du système sous forme d'équations d'état permet de le représenter dans l'espace d'état, selon la formulation de l'ensemble d'équations II.36.

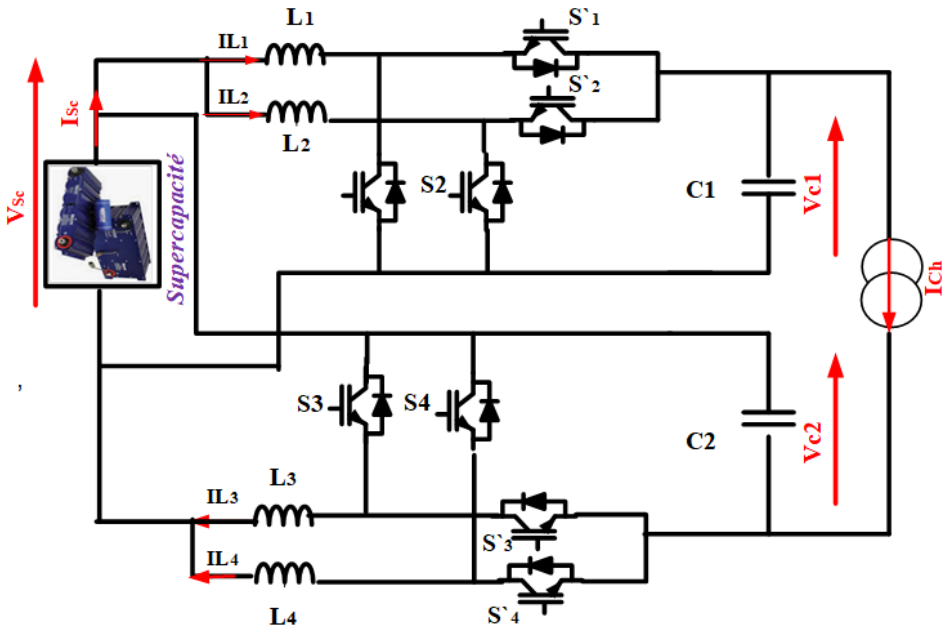


FIGURE II.11 : Convertisseur DC/DC entrelacé flottant à 4 phases dédié a la Sc.

Le vecteur d'état, le vecteur de sortie, ainsi que l'entrée du système sont définis comme suit :

$$\begin{cases} x = [I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}, I_{L4}, V_{C1}, V_{C2}]^T \\ y = [V_{SC}, I_{\text{Ch}}]^T \\ u = V_{\text{bus}} \end{cases} \tag{II.46}$$

Le vecteur des dérivées d'état est défini comme suit :

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{pmatrix} \tag{II.47}$$

Lors de l'alternance des modes de fonctionnement, le convertisseur bidirectionnel entrelacé flottant (FIBDC) fonctionne en mode de conduction forcée (FCM). Le modèle du FIBDC intègre à la fois les phases de charge et de décharge de la source d'énergie.

Ces deux états de fonctionnement peuvent être représentés par une seule et même structure modélisée. Ainsi, le modèle unifié présenté en équation (5) reste valide, y compris en cas de transition entre les deux modes.

II.4.2.1.b Mode décharge

En cas de forte demande en puissance ou lorsque le niveau de charge (SOC) de la supercapacité est élevé, le convertisseur bidirectionnel entrelacé flottant (FIBDC) fonctionne en mode boost. Dans ce contexte, la pile à combustible est déconnectée (mode décharge) et le flux d'énergie est transféré du supercondensateur vers le bus DC.

Le fonctionnement du convertisseur est supposé se dérouler en mode de conduction continue (CCM). On note U_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ le signal de commande appliqué aux interrupteurs S_1, S_2, S_3 et S_4.

Lorsque les interrupteurs S_1, S_2, S_3, S_4 sont activés ($U_i = 1$) et que leurs compléments S'_1, S'_2, S'_3, S'_4 sont désactivés, les inductances emmagasinent l'énergie des modules de stockage, tandis que les condensateurs libèrent de l'énergie vers le bus DC. À l'inverse, lorsque les interrupteurs S_1, S_2, S_3, S_4 sont ouverts ($U_i = 0$) et que les interrupteurs complémentaires S'_1, S'_2, S'_3, S'_4 sont fermés, l'énergie accumulée dans les inductances est transférée vers les condensateurs et le bus continu. Ainsi, l'énergie circule du supercondensateur vers la charge, ce qui correspond à un fonctionnement en mode boost.

La représentation de ce fonctionnement dans l'espace d'état, en mode décharge, est donnée par le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_1-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_2-1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_3-1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_4-1}{L} \\ \frac{1-d_1}{C} & \frac{1-d_2}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-d_3}{C} & \frac{1-d_4}{C} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{SC} \\ I_{\text{Ch}} \end{pmatrix} \quad \text{(II.48)}$$

Les matrices d'entrée et de sortie du système sont alors définies par :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(II.49)}$$

II.4.2.1.c Mode charge

Comme illustré dans **la figure 2**, le convertisseur est constitué de deux modules. Lorsque la demande de puissance est faible, ou que le niveau de charge (SOC) de la supercapacité est bas, le FIBDC (Floating Interleaved Bidirectional DC/DC Converter) fonctionne en mode buck, afin de charger la supercapacité.

Durant cette phase, le mode de fonctionnement reste en conduction continue (CCM). On suppose que U'_i ($i = 1, 2, 3, 4$) est le signal de commande des interrupteurs S'_1, S'_2, S'_3, S'_4.

Lorsque les interrupteurs S'_1, S'_2, S'_3, S'_4 sont activés ($U'_i = 1$) et que les interrupteurs S_1, S_2, S_3, S_4 sont ouverts, les inductances stockent l'énergie provenant du bus continu DC, tandis que les condensateurs délivrent cette énergie vers les bancs de batteries ou de stockage.

Inversement, lorsque les interrupteurs S'_i sont désactivés ($U'_i = 0$) et que les interrupteurs S_i sont fermés, les inductances libèrent leur énergie vers la supercapacité. Ainsi, l'énergie est transférée du bus DC vers la supercapacité, ce qui correspond à un fonctionnement en mode buck.

Le modèle d'espace d'état associé à cette phase de charge est donné par le système suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{dI_{L1}}{dt} \\ \frac{dI_{L2}}{dt} \\ \frac{dI_{L3}}{dt} \\ \frac{dI_{L4}}{dt} \\ \frac{dV_{C1}}{dt} \\ \frac{dV_{C2}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_2}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_3}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_4}{L} \\ \frac{d'_1}{C} & \frac{d'_2}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d'_3}{C} & \frac{d'_4}{C} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{SC} \\ I_{\text{Ch}} \end{pmatrix} \tag{II.50}$$

Le FIBDC étant piloté par une modulation de largeur d'impulsion (PWM) complémentaire, les rapports cycliques des interrupteurs principaux et secondaires sont liés par la relation :

$$U'_i = 1 - U_i \quad \text{avec} \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{II.51}$$

En injectant la relation II.51 dans l'équation II.50, on obtient une structure dynamique équivalente à celle du mode boost (cf. équation II.49), ce qui démontre que les deux modes de fonctionnement charge et décharge peuvent être décrits par une représentation unifiée dans le même formalisme d'état.

II.4.2.2 Topologie entrelacé flottant à quatre phases dédié à la dédie à la Batterie

À l'instar du convertisseur bidirectionnel associé à la supercapacité, celui relié à la batterie assure un échange d'énergie contrôlé entre la source de stockage et le bus continu. Cependant, son fonctionnement se distingue par la nature des régimes visés : alors que la supercapacité répond aux sollicitations transitoires et rapides, la batterie intervient majoritairement dans la gestion énergétique à moyenne ou longue durée.

Le convertisseur utilisé ici est aussi de type bidirectionnel entrelacé à quatre phases, commandé

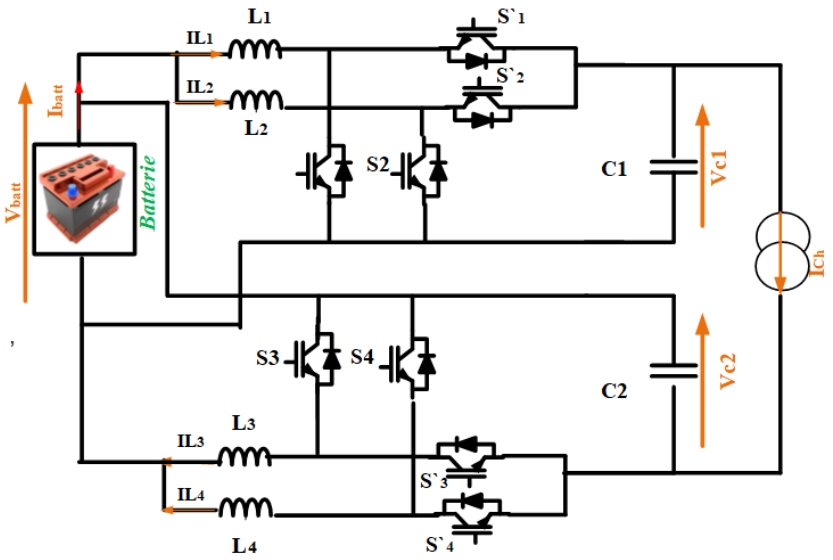


FIGURE II.12 : Convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant dédié a la batterie.

en mode continu (CCM). Il permet à la batterie de fonctionner alternativement en mode décharge (boost) ou en mode recharge (buck), selon les conditions du système. En phase décharge, l'énergie est transférée vers le bus DC pour assister la pile à combustible ou maintenir la tension lors de

fortes sollicitations. En phase recharge, une partie de l'excédent d'énergie disponible sur le bus est redirigée vers la batterie, par modulation du rapport cyclique.

Dans ce contexte, les équations différentielles suivantes expriment la dynamique du courant dans la batterie et la tension du bus DC :

$$\frac{dI_{\text{batt}}}{dt} = \sum_{i=1}^{4} \frac{dI_{L_i}}{dt} - \frac{dI_{\text{Ch}}}{dt} \quad \text{et} \quad \frac{dV_{\text{bus}}}{dt} = \sum_{i=1}^{2} \frac{dV_{C_i}}{dt} - \frac{dV_{\text{batt}}}{dt} \tag{II.52}$$

Ces expressions traduisent l'équilibre énergétique entre les éléments de stockage (inductances, condensateurs) et les sources/charges connectées au système.

Le FIBDC intègre à la fois les modes de charge et de décharge dans un seul modèle dynamique. Ce modèle unifié est exprimé sous forme d'espace d'état, comme suit :

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_2}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_3}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{d'_4}{L} \\ \frac{d'_1}{C} & \frac{d'_2}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d'_3}{C} & \frac{d'_4}{C} & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{A} \begin{pmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} V_{\text{batt}} \\ I_{\text{Ch}} \end{pmatrix} \tag{II.53}$$

où la matrice d'entrée B est donnée par :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \tag{II.54}$$

et les sorties y (tension de Batterie V_{bat} et courant de charge I_{charge}) sont sélectionnées par la matrice C_i suivante (commune aux 4 phases) :

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \tag{II.55}$$

Le système est commandé à l'aide d'une modulation par largeur d'impulsion complémentaire (PWM). Ainsi, la relation entre les signaux de commande principaux et secondaires est donnée par :

$$U'_i = 1 - U_i \qquad (i = 1, 2, 3, 4) \tag{II.56}$$

Il convient de noter que la démarche de modélisation appliquée au convertisseur bidirectionnel dédié à la batterie conduit, par analogie, à une structure dynamique équivalente à celle obtenue pour le convertisseur associé à la supercapacité. Les équations d'état résultantes présentent la même organisation matricielle. Cette similarité structurelle permet une unification des stratégies de commande et de simulation, tout en réduisant la complexité de traitement dans les environnements multiphysiques.

La modélisation moyenne fournit une représentation simplifiée du comportement dynamique global du convertisseur, en supprimant les effets de commutation à haute fréquence et en se

concentrant sur les variations lentes des grandeurs électriques. Cette approche est particulièrement utile pour analyser la stabilité du système, évaluer les régimes de fonctionnement et concevoir des stratégies de commande à un niveau macroscopique.

Cependant, pour la conception fine des régulateurs et l'analyse de la réponse dynamique aux perturbations, il est nécessaire de disposer d'une description linéarisée du système autour d'un point de fonctionnement donné.

C'est pourquoi on procède à une **linéarisation en petits signaux**, consistant à décomposer chaque variable moyenne en une composante continue représentant son état d'équilibre, et une composante dynamique de faible amplitude traduisant les variations autour de cet équilibre. Cette étape permet de transformer le modèle moyen en un système linéaire à coefficients constants, exploitable pour l'extraction des fonctions de transfert et la synthèse des lois de commande.

Pour ce faire, on définit un système linéaire équivalent, capable de représenter le comportement dynamique du système réel en régime de petits signaux, c'est-à-dire autour d'un point de fonctionnement quasi-statique. Cette approche permet de linéariser les non-linéarités locales en analysant les variations des variables autour de leurs valeurs moyennes.

Chaque variable x est ainsi exprimée comme la somme d'une :

- Composante continue (ou valeur moyenne) notée X (en majuscule),
- Composante dynamique de petit-signal notée $\widetilde{x}$ (en minuscule avec tilde).

On a donc :

$$x = X + \widetilde{x} \tag{II.57}$$

II.4.3 Modélisation petit-signal du convertisseur flottant entrelacé à quatre phases

Dans le cadre de l'analyse petit-signal, les variables d'état, les signaux de commande ainsi que les rapports cycliques de chaque phase du convertisseur sont décomposés en deux composantes :

- Une composante continue (ou moyenne), représentant le point de fonctionnement stationnaire ;
- Une composante alternative (ou perturbation), traduisant les écarts dynamiques autour de ce point.

Cette représentation, fondée sur les hypothèses de modélisation établies précédemment, permet de transformer les équations différentielles non linéaires décrivant le système en un ensemble d'équations linéarisées autour du régime nominal.

Ainsi, le système obtenu prend la forme donnée par (II.57). Cette approche constitue la base de l'analyse fréquentielle et de la conception des lois de commande, telles que présentées dans les travaux de référence [160].

On définit ainsi :

$$\begin{cases} x = X + \widetilde{x}, \\ d = D + \widetilde{d}, \\ u = U + \widetilde{u}, \end{cases} \tag{II.58}$$

où :

- X, D, U : valeurs continues au point de fonctionnement,

- $\widetilde{x}, \widetilde{d}, \widetilde{u}$: variations petit-signal.

À partir des équations différentielles issues de l'application des lois de Kirchhoff :

- **Loi des mailles** : tensions aux bornes des inductances et condensateurs,
- **Loi des nœuds** : courants dans les réseaux de commutation,

et en ne conservant que la composante alternative du premier ordre, on obtient le modèle linéarisé suivant sous forme état-espace :

$$\frac{d\widetilde{\mathbf{x}}(t)}{dt} = A\,\widetilde{\mathbf{x}}(t) + B\,\widetilde{\mathbf{u}}(t) + C\,\widetilde{\mathbf{d}}(t), \tag{II.59}$$

avec :

$$\widetilde{\mathbf{x}}(t) = \left[\widetilde{i}_{L_1}(t) \quad \widetilde{i}_{L_2}(t) \quad \widetilde{i}_{L_3}(t) \quad \widetilde{i}_{L_4}(t) \quad \widetilde{v}_{C_1}(t) \quad \widetilde{v}_{C_2}(t)\right]^T, \tag{II.60}$$

$$\widetilde{\mathbf{u}}(t) = \left[\widetilde{v}_{in}(t)\right], \qquad \widetilde{\mathbf{d}}(t) = \left[\widetilde{d}(t)\right]. \tag{II.61}$$

Matrices du modèle

Les matrices A, B et C obtenues après linéarisation sont données par :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -D'/L_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -D'/L_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -D'/L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -D'/L_4 \\ D'/C_1 & D'/C_1 & 0 & 0 & -1/(RC_1) & -1/(RC_1) \\ 0 & 0 & D'/C_2 & D'/C_2 & -1/(RC_2) & -1/(RC_2) \end{bmatrix}, \tag{II.62}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L_1 \\ 1/L_2 \\ 1/L_3 \\ 1/L_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{II.63}$$

$$C = \begin{bmatrix} V_{C_1}/L_1 \\ V_{C_1}/L_2 \\ V_{C_2}/L_3 \\ V_{C_2}/L_4 \\ -(I_{L_1} + I_{L_2})/C_1 \\ -(I_{L_3} + I_{L_4})/C_2 \end{bmatrix}, \tag{II.64}$$

où $D' = 1 - D$.

Ce modèle (II.59)–(II.64) constitue la base pour la détermination des fonctions de transfert petit-signal du convertisseur et à la conception des régulateurs [161].

II.5 Commande des convertisseurs

Dans un convertisseur DC/DC entrelacé flottant à quatre phases, une stratégie de régulation hiérarchisée est nécessaire pour garantir à la fois la stabilité dynamique, le partage équilibré de courant et la régulation précise de la tension de sortie. Cette stratégie repose sur la mise en œuvre de deux boucles de régulation indépendantes, chacune basée sur un régulateur proportionnel-intégral (PI), adapté à son objectif spécifique. La première boucle, dite interne, est dédiée à

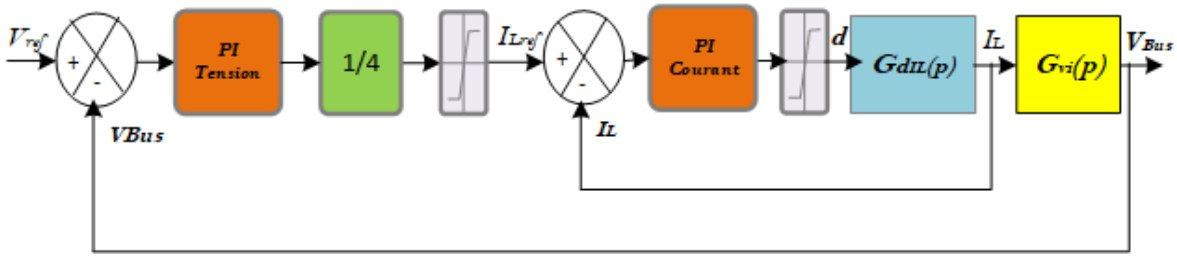


FIGURE II.13 : Régulation PI imbriquées courant tension

la régulation du courant par phase. Chaque phase est commandée indépendamment à l'aide d'un régulateur PI, ce qui permet une réponse rapide et une stabilisation efficace du courant traversant les inductances. Cette régulation fine est particulièrement critique lorsque la source d'alimentation est une pile à combustible, connue pour sa dynamique lente et sa sensibilité aux variations brusques de courant [162].

La seconde boucle, dite externe, assure la régulation globale de la tension de sortie du système. Elle agit sur la tension du bus DC (V_{BUS}) en ajustant le rapport cyclique des interrupteurs, à partir de l'écart entre la tension mesurée et une tension de référence. Contrairement à la régulation de courant, cette commande est unique pour l'ensemble du convertisseur et opère sur des dynamiques plus lentes.

Ce découplage temporel et fonctionnel entre les deux boucles permet d'obtenir une régulation robuste face aux perturbations et aux variations de charge, tout en maintenant la stabilité du système. À partir du modèle d'état petit-signal donné par (II.59), il est possible d'établir **les fonctions de transfert** reliant les entrées (commande ou excitation) aux variables d'état. Pour cela, on applique la transformée de Laplace au système afin de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel, ce qui permet une représentation plus adaptée à l'analyse fréquentielle et à la conception des régulateurs.

En fixant alternativement l'une des entrées à zéro, on obtient :

$$\begin{cases} G_{xd}(p) = \dfrac{\tilde{x}(p)}{\tilde{d}(p)} = (sI - A)^{-1}C, \quad \text{avec} \quad \tilde{u}(p) = 0, \\ G_{xu}(p) = \dfrac{\tilde{x}(p)}{\tilde{u}(p)} = (sI - A)^{-1}B, \quad \text{avec} \quad \tilde{d}(p) = 0, \end{cases} \tag{II.65}$$

où I est la matrice identité. La première expression décrit l'influence du rapport cyclique sur les états du système, tandis que la seconde exprime l'effet de la tension d'entrée.

En extrayant les grandeurs d'intérêt, par exemple la relation entre le rapport cyclique et le courant inductif, ou entre le rapport cyclique et la tension de sortie, on obtient :

$$\begin{cases} G_{d\tilde{i}_L}(p) = \dfrac{\tilde{i}_L(p)}{\tilde{d}(p)} = \dfrac{V_{\text{in}}}{1-D} \cdot \dfrac{RC\,p + D + 3}{RLC\,p^2 + 2L\,p + 2R(1-D)^2}, \\ G_{d\tilde{v}_{\text{bus}}}(p) = \dfrac{\tilde{v}_{\text{bus}}(p)}{\tilde{d}(p)} = \dfrac{2V_{\text{in}}}{(1-D)^2} \cdot \dfrac{2R(1-D)^2 - (1+D)L\,p}{RLC\,p^2 + 2L\,p + 2R(1-D)^2}. \end{cases} \tag{II.66}$$

Ces deux fonctions de transfert serviront respectivement à la synthèse des boucles de régulation interne (courant) et externe (tension).

Pour analyser le couplage entre les deux boucles, il est utile de définir la fonction de transfert suivante :

$$G_{vi}(p) \triangleq \frac{G_{d\tilde{v}_{bus}}(p)}{G_{d\tilde{i}_L}(p)}. \tag{II.67}$$

En substituant les expressions de (II.66) dans (II.67), on obtient la forme :

$$G_{vi}(p) = \frac{\dfrac{2V_{\text{in}}}{(1-D)^2} \cdot \big[2R(1-D)^2 - (1+D)L\,p\big]}{\dfrac{V_{\text{in}}}{1-D} \cdot \big[RC\,p + D + 3\big]}. \tag{II.68}$$

On remarque que les dénominateurs quadratiques initiaux se simplifient car ils sont identiques dans les deux fonctions de transfert.

En simplifiant le facteur de gain en tête, on obtient :

$$\frac{\dfrac{2V_{\text{in}}}{(1-D)^2}}{\dfrac{V_{\text{in}}}{1-D}} = \frac{2}{1-D}. \tag{II.69}$$

En reportant cette simplification dans (II.68), on arrive à l'expression finale :

$$\boxed{G_{vi}(p) = \frac{2}{1-D} \cdot \frac{2R(1-D)^2 - (1+D)L\,p}{RC\,p + D + 3}}. \tag{II.70}$$

Cette forme met clairement en évidence :

- le gain statique proportionnel à $\frac{2}{1-D}$,
- la dépendance en R, L et C,
- et l'impact du rapport cyclique D sur la dynamique.

II.5.1 Régulation du courant des sources

Dans les architectures multiphases, le pilotage précis du courant dans chaque inductance constitue une exigence clé pour assurer un équilibrage optimal de la puissance entre les branches. Chaque canal de conversion est ainsi équipé d'un contrôleur local de type PI, conçu pour suivre une consigne de courant indépendante. Cette approche distribuée permet de limiter les oscillations inter-phases, de réduire le courant de crête et d'améliorer l'efficacité globale. Elle se révèle particulièrement efficace dans les systèmes alimentés par une pile à combustible, Supercapacité ou Batterie. [162, 163, 164].

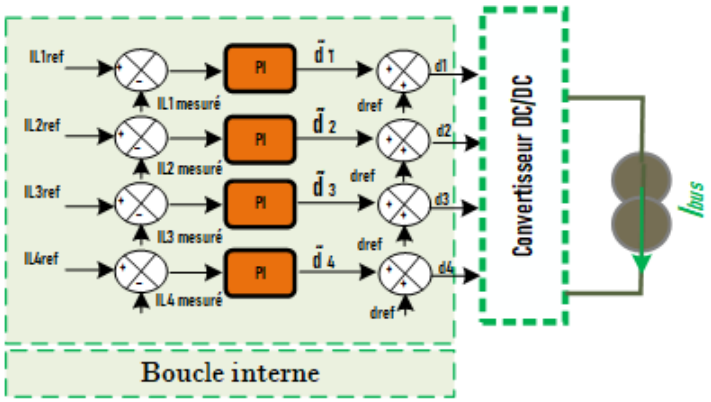


FIGURE II.14 : Régulation des courants

Ce type de régulateur est utilisé pour les topologies boost entrelacées, décrites dans l'équation II.45 . Il permet notamment d'assurer une répartition équilibrée des courants instantanés entre les différentes phases du convertisseur.

la figure II.14, illustre Quatre boucles de régulation du courant , une par phase, dans lesquelles chaque courant mesuré (I_1 à I_4) est comparé à sa consigne ($IL1_{\text{ref}}$ à $IL4_{\text{ref}}$), puis régulé par un contrôleur PI avant la génération du rapport cyclique de commande (d_1 à d_4), envoyé à chaque module PWM.

II.5.2 Régulation de la tension du bus continu

En parallèle, une boucle de régulation centrale est chargée de maintenir la tension du bus DC à sa valeur de consigne, en intégrant les fluctuations de charge ou de production. Ce régulateur global ajuste dynamiquement le ratio cyclique des commutateurs à partir de l'écart entre la tension mesurée et la référence système. Contrairement au pilotage par phase, cette commande agit sur une dynamique plus lente et assure la stabilité à long terme de la tension de sortie. Elle constitue l'ossature du pilotage énergétique dans les systèmes hybrides, où plusieurs sources interagissent [165].

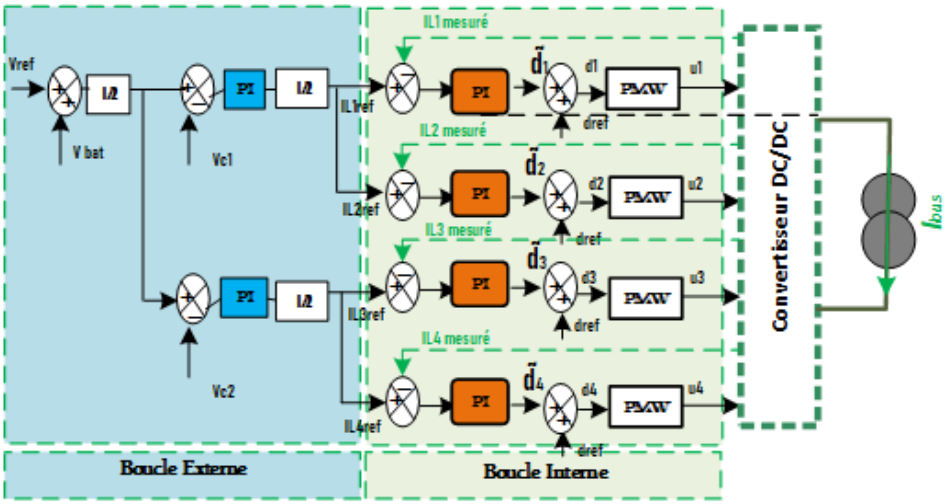


FIGURE II.15 : Régulation tension

Les boucles de régulation illustrées dans **la figure II.15** sont appliquées au convertisseur

bidirectionnel entrelacé flottant (FIBDC) à quatre phases. Afin d'évaluer les performances du système dans ce mode de fonctionnement, les mêmes conditions que celles du cycle de conduite normalisé (NEDC) sont utilisées.

La boucle de régulation de la tension, génère une consigne de courant pour chaque phase à partir de l'écart entre la tension de référence V_{ref} et la tension mesurée sur chaque condensateur (V_{C1}, V_{C2}).

Cette structure hiérarchique permet une commande indépendante de chaque phase tout en assurant une régulation globale de la tension, optimisant ainsi la stabilité du système, la réponse dynamique, et la symétrie des courants entre les branches entrelacées.

La complémentarité temporelle entre ces deux boucles – rapide pour le courant, plus lente pour la tension – permet une séparation efficace des tâches de régulation, réduisant ainsi les interactions indésirables et facilitant la conception modulaire des contrôleurs.

II.6 Conclusion

Ce chapitre a posé les fondements théoriques indispensables à la compréhension et à la maîtrise d'un système hybride multi-sources, en proposant une modélisation complète et hiérarchisée de ses principaux constituants. La représentation dynamique des trois sources d'énergie — pile à combustible, batterie lithium-ion et supercapacité — a permis de cerner leurs comportements respectifs à différentes échelles de temps, à l'aide de modèles différenciés mais compatibles pour une intégration temps réel.

Les convertisseurs entrelacés flottants à quatre phases, qu'ils soient unidirectionnels ou bidirectionnels, ont été modélisés à l'aide d'une approche en signaux moyens, conduisant à des formes matricielles généralisables. Ces modèles facilitent à la fois l'analyse fréquentielle, la synthèse des lois de commande, et leur implémentation dans un environnement de simulation ou sur une plateforme temps réel.

Enfin, la stratégie de régulation développée repose sur une double boucle PI, combinant une commande rapide du courant par phase et une supervision centralisée de la tension du bus DC. Cette architecture hiérarchique assure un pilotage souple, modulaire et efficace, répondant aux contraintes des systèmes hybrides embarqués.

Les travaux menés dans ce chapitre forment une base rigoureuse pour le développement de stratégies avancées de gestion d'énergie, de supervision intelligente, ainsi que pour la validation HIL dans les chapitres suivants.

Chapitre III

Stratégies de gestion d'énergie et de diagnostic

Table de matières

III.1 Introduction . . . 76
III.2 Système hybride à deux sources . . . 76
III.2.1 Architecture PAC/Supercondensateur . . . 77
III.2.1.1 Stratégie de gestion d'énergie PAC–Supercapacité . . . 77
III.2.1.2 Implémentation algorithmique . . . 78
III.2.1.3 Résultats de simulation PAC/Sc . . . 80
III.2.1.4 Discussion . . . 86
III.2.2 Architecture PAC–Batterie . . . 87
III.2.2.1 Stratégie de gestion d'énergie PAC–Batterie . . . 87
III.2.2.2 Implémentation algorithmique . . . 88
III.2.2.3 Résultats de simulation de l'architecture PAC–Batterie . . . 90
III.3 Système hybride à trois sources . . . 94
III.3.1 Stratégie de gestion d'énergie . . . 94
III.3.2 Résultats de simulation . . . 100
III.3.3 Analyse comparative des stratégies de gestion énergétique et mise en valeur de l'hybridation tri-sources . . . 105
III.4 Surveillance du système . . . 106
III.5 Motivation et contexte . . . 107
III.6 Synthèse de l'observateur . . . 107
III.6.1 Observateur à mode glissant . . . 107
III.6.2 Définition de la surface de glissement . . . 108
III.7 Observateur par mode glissant pour la batterie . . . 108
III.7.1 Analyse de stabilité par Lyapunov . . . 109
III.7.1.1 Application à la détection de défauts de batterie . . . 110
III.7.1.2 Avantages et limites . . . 110
III.8 Les défauts des batteries . . . 111
III.8.1 Méthodologie de diagnostic des défauts par observateur en mode glissant . . . 111
III.8.1.1 Tension mesurée avec défaut capteur . . . 114

III.8.2 Effet de défaut capteur de tension sur l'état de charge 114
III.8.3 Représentation d'état de la batterie avec défaut court circuit 116
III.8.4 Synthèse de l'observateur SMO pour la détection de court-circuit interne . . 118
III.8.5 Détection d'un défaut de court-circuit interne par observateur et méthode CUSUM 119
III.8.5.1 Efficacité de la méthode 120
III.9 Conclusion 123

IV Validation Expérimentale **125**

III.1 Introduction

La gestion d'énergie dans un système hybride intégrant une batterie, une supercapacité et une pile à combustible constitue un levier fondamental pour améliorer les performances globales, l'autonomie énergétique et la durée de vie des composants électrochimiques. Compte tenu des caractéristiques dynamiques distinctes de chaque source :capacité énergétique, densité de puissance, temps de réponse; il est indispensable de mettre en œuvre une stratégie de gestion hiérarchique et adaptée pour assurer une répartition optimale de la puissance.

Dans cette étude, plusieurs stratégies de gestion d'énergie ont été développées selon une approche déterministe, puis validées par simulation sous *MATLAB/Simulink*. Ces stratégies exploitent la complémentarité des sources en respectant leurs constantes de temps et contraintes de rampe : la **pile à combustible** est pilotée à *puissance quasi constante*, proche de son point de rendement maximal, de sorte qu'elle **couvre la composante moyenne** de la charge et rétablit lentement l'état de charge des stockages ; la **batterie** prend en charge les **écarts de puissance de durée moyenne** (quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes) et les demandes prolongées ; la **supercapacité** délivre/absorbe les **pics de puissance très rapides** (millisecondes à secondes) et **capte en priorité la récupération d'énergie** au freinage, l'excédent éventuel étant ensuite transféré vers la batterie [166].

Parallèlement à la gestion énergétique, un effort particulier a été consacré à la surveillance de l'état interne de la batterie et à la détection précoce de défauts. À cette fin, un observateur en mode glissant a été conçu pour estimer en temps réel l'état de charge (SOC) de la batterie. Cette approche permet non seulement une estimation précise du SOC, mais également la détection d'anomalies telles que les défauts capteurs ou les courts-circuits internes.

Ainsi, ce chapitre s'articule en deux parties complémentaires. Dans un premier temps, il présente les différentes stratégies de gestion d'énergie adoptées pour assurer la coordination dynamique entre les trois sources. Dans un second temps, il décrit la modélisation, la conception et la mise en œuvre de l'observateur en mode glissant, en mettant en lumière sa capacité à améliorer la fiabilité du système et à détecter les défaillances critiques de la batterie.

III.2 Système hybride à deux sources

Dans le cadre de la conception d'une stratégie de gestion d'énergie pour un système hybride, il est crucial de commencer par des configurations simplifiées, permettant une compréhension progressive des interactions énergétiques entre les composants. Cette partie présente ainsi deux configurations fondamentales à deux sources : la première associe une pile à combustible (PAC) à

une supercapacité (Sc), tandis que la seconde couple la PAC à une batterie lithium-ion. Ces deux architectures constituent les blocs de base de l'extension vers une configuration à trois sources étudiée dans les chapitres ultérieurs.

III.2.1 Architecture PAC/Supercondensateur

La première configuration étudiée repose sur l'association d'une PAC, caractérisée par une bonne densité énergétique mais une dynamique lente, et d'une supercapacité, réputée pour sa réactivité et sa capacité à absorber rapidement les variations de puissance. Cette combinaison vise à exploiter la complémentarité entre ces deux sources : la PAC assure la production d'énergie moyenne à long terme, tandis que la supercapacité compense les pics de demande de puissance durant les phases transitoires (accélérations, freinage).

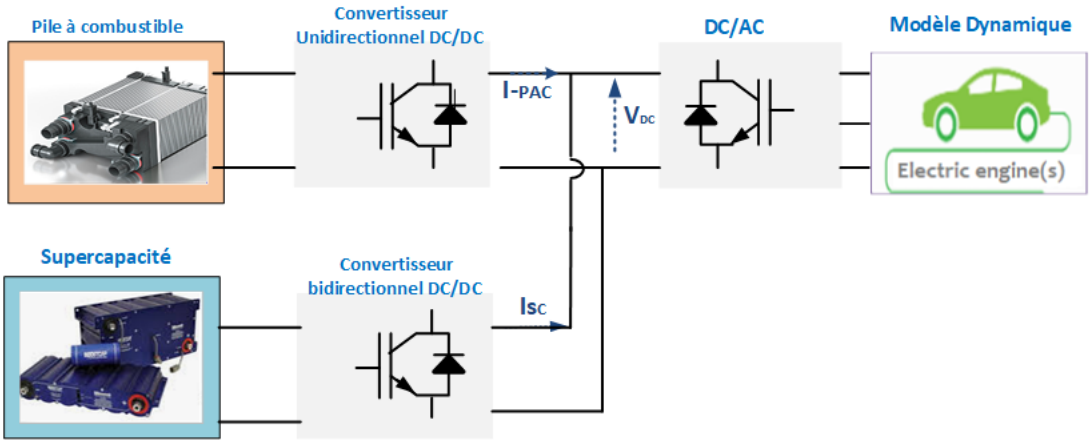


FIGURE III.1 : Architecture PAC–Supercapacité.

Dans ce scénario, la stratégie de gestion repose sur un découplage temporel. Une logique déterministe à base de seuils de courant pilote la contribution de la supercapacité afin de protéger la PAC contre les variations brusques, améliorant ainsi sa durée de vie et son rendement global.

La figure III.1 illustre l'architecture globale du système. La PAC est connectée à la charge via un convertisseur DC/DC unidirectionnel élévateur, alors que la supercapacité est reliée par un convertisseur DC/DC bidirectionnel entrelacé à quatre phases, permettant la gestion dynamique du flux d'énergie dans les deux sens. L'ensemble des convertisseurs est commandé par une unité centrale de gestion d'énergie.

III.2.1.1 Stratégie de gestion d'énergie PAC–Supercapacité

La stratégie adoptée est une logique déterministe hiérarchique qui (i) exploite la PAC dans une zone de fonctionnement efficiente et (ii) confie à la supercapacité l'absorption/la fourniture des écarts rapides entre la demande P_{ch} et la capacité instantanée de la PAC, tout en maintenant SOC_{sc} dans une bande de sécurité. Deux situations sont distinguées : *traction* ($P_{\mathrm{ch}} \geq 0$) et *régénération* ($P_{\mathrm{ch}} < 0$). La PAC est prioritairement régulée dans sa plage admissible $[P_{\mathrm{PAC,min}}, P_{\mathrm{PAC,opt}}, P_{\mathrm{PAC,max}}]$ pour préserver rendement et durabilité, tandis que la supercapacité joue le rôle de tampon haute puissance. Cette coordination limite l'ondulation côté source, stabilise le bus DC et réduit la sollicitation de la PAC [119].

III.2.1.2 Implémentation algorithmique

L'algorithme prend en entrée P_{ch} et SOC_{sc} et fournit la consigne $P_{\text{PAC,ref}}$ (la supercapacité assurant le complément dynamique). Il se résume à trois règles de haut niveau :

1. **Gestion de mode** : en *régénération*, la PAC est inhibée et l'énergie récupérée est dirigée vers la supercapacité ; en *traction*, la PAC couvre la composante moyenne et la supercapacité compense les transitoires.
2. **Priorité de la PAC** : $P_{\text{PAC,ref}}$ est bornée par $[P_{\text{PAC,min}}, P_{\text{PAC,max}}]$ avec un point préférentiel $P_{\text{PAC,opt}}$; la supercapacité fournit/absorbe la différence $P_{\text{ch}} - P_{\text{PAC,ref}}$ sous réserve de ses limites.
3. **Protection par SOC_{sc}** : si SOC_{sc} est bas, la stratégie favorise une recharge opportuniste lorsque la demande le permet ; s'il est élevé, l'absorption est limitée pour éviter la surcharge et préserver la longévité.

Cette synthèse correspond à l'organigramme de la Fig. III.2 et constitue la base de la commande embarquée utilisée lors des validations.

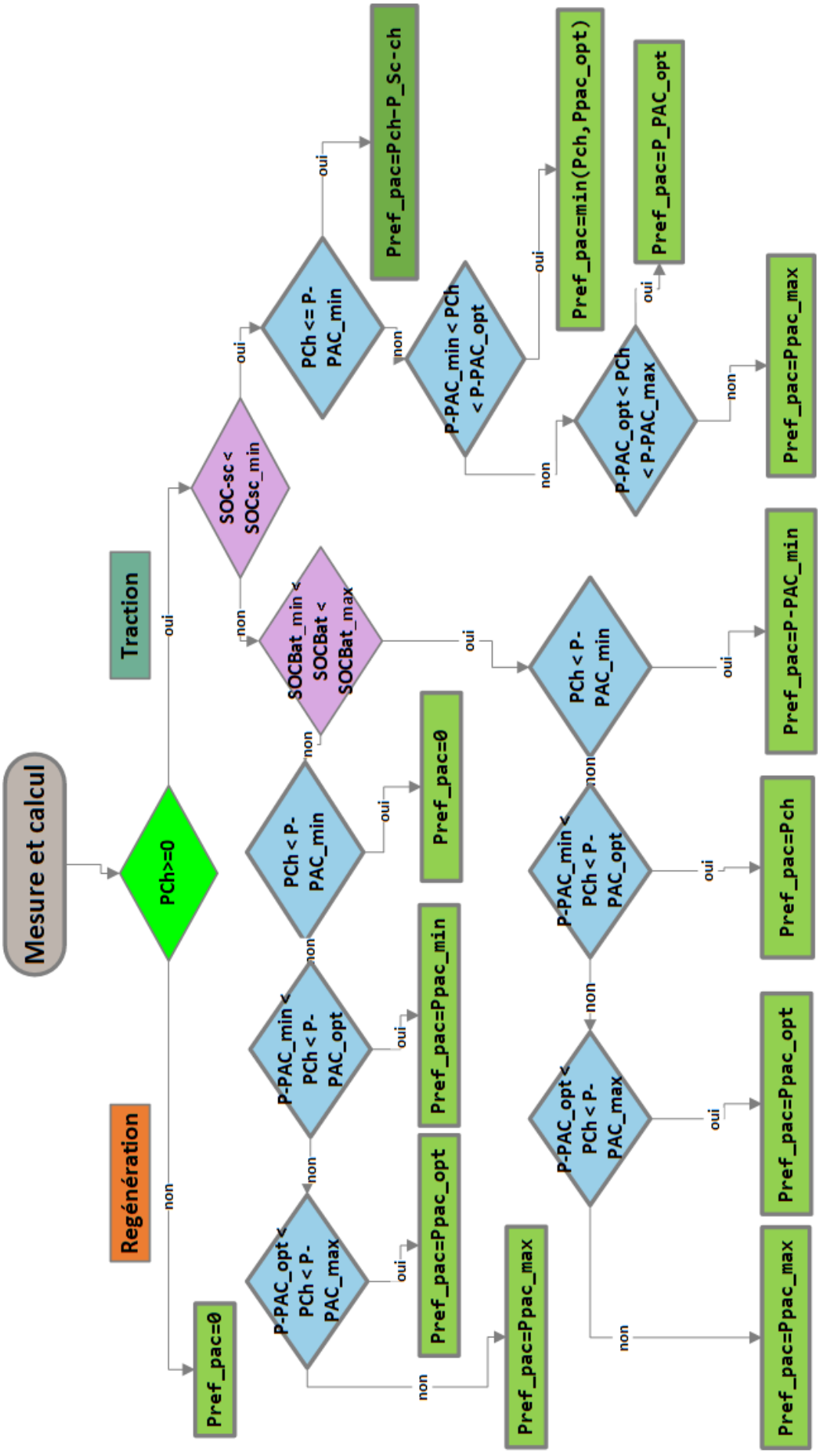


FIGURE III.2 : Algorithme de la stratégie de gestion d'énergie pour le système hybride PAC–Sc.

Cette stratégie repose sur un algorithme décisionnel déterministe hiérarchisé, très efficace en simulation temps réel. Sa mise en œuvre dans Simulink/Stateflow facilite sa transposition sur les plateformes HIL. Elle garantit également :

- Une répartition dynamique et réactive de la puissance en fonction de l'état du système.
- Une protection des sources par respect de leurs limites de fonctionnement.
- Une réduction de l'usure de la PAC par maintien à sa plage optimale $[P_{PAC_opt}, P_{PAC_max}]$.

III.2.1.3 Résultats de simulation PAC/Sc

Les résultats de simulation s'articulent autour de deux axes complémentaires, permettant d'évaluer à la fois l'efficacité de la gestion énergétique du système hybride et la performance des boucles de régulation. En particulier, l'analyse met en évidence l'impact du contrôle de courant amélioré des convertisseurs boost entrelacés flottants sur la stabilité et la dynamique des courants d'inductance, conformément aux principes présentés dans [162].

Les paramètres de simulation sont présentés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Paramètres de simulation.

Paramètre	**Valeur**
Tension nominale du bus DC	100 V
Capacité de la batterie	18 Ah
Capacité de la supercapacité	300 F
Puissance de la pile à combustible	1.2 kW
Fréquence de découpage	20 kHz
Inductance par phase (convertisseur)	150 µH
Capacité de filtrage (convertisseur)	470 µF
Nombre de phases du convertisseur	4
Temps de simulation	1200 s

Ces paramètres ont été sélectionnés a partir de plusieurs recherches [72, 167, 168, 169, 170, 171] pour représenter fidèlement les caractéristiques dynamiques des sources d'énergie hybrides (pile à combustible, supercapacité, batterie lithium-ion) ainsi que des convertisseurs DC/DC entrelacés à quatre phases. Ces paramètres assurent une représentation réaliste du système et garantissent la reproductibilité des résultats expérimentaux.

Profil NEDC

Pour valider la gestion d'énergie, nous utilisons un cycle de conduite standardisé.
Dans **la figure** III.3, le **New European Driving Cycle (NEDC)** sert de consigne de vitesse de référence : sa structure simple et reproductible en fait un choix courant pour les simulations [172, 173, 174]. Le NEDC combine une phase urbaine (ECE-15, répétée quatre fois) et une phase extra-urbaine (EUDC), pour une durée totale de 1180 s, une distance de 11,007 km et une vitesse moyenne d'environ 33,6 km/h. Notons qu'il est progressivement remplacé par le WLTP pour l'homologation, mais reste pertinent pour nos scénarios [175, 176].

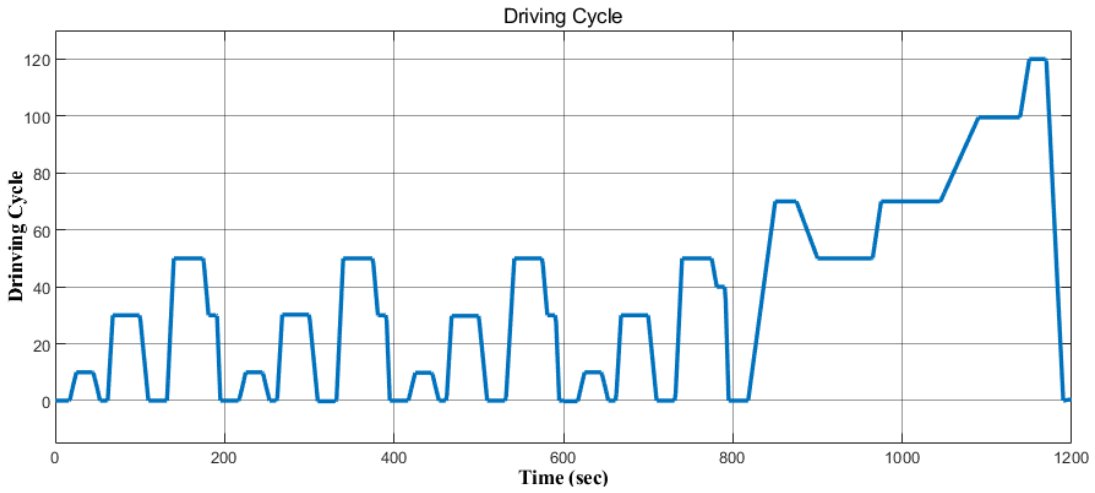


FIGURE III.3 : Profil de vitesse du cycle NEDC (New European Driving Cycle).

L'intérêt de ce cycle dans le contexte des systèmes hybrides étudiés réside dans sa capacité à activer de manière complémentaire les différentes sources du système : la supercapacité est sollicitée pour les variations rapides de puissance et les phases de freinage régénératif, la batterie intervient lors des transitoires de moyenne intensité, tandis que la pile à combustible couvre la charge moyenne de manière stable. En outre, l'usage du NEDC dans de nombreux travaux antérieurs facilite la comparaison directe des performances obtenues avec d'autres stratégies de gestion d'énergie [75].

Axe 1 – Gestion d'énergie entre la pile à combustible et la supercapacité

Le premier axe est dédié à l'étude de la répartition dynamique de la puissance entre la pile à combustible (PAC) et la supercapacité (SC) en fonction des variations de la charge. L'objectif est de vérifier que la stratégie de gestion d'énergie assure l'utilisation prioritaire de la PAC pour fournir la puissance continue, tout en mobilisant la SC pour absorber ou fournir la puissance lors des transitoires rapides.

Les grandeurs analysées dans ce cadre sont :

- La **caractéristique des puissances**, regroupant la puissance fournie par la PAC ($P-$PAC), celle fournie par la SC ($P-$SC) et la puissance demandée par la charge ($P-$charge) ;
- Le **SOC de la SC**, indicateur de son niveau de disponibilité énergétique ;
- La **caractéristique des tensions des sources**, comprenant la tension de la PAC ($V-$PAC) et celle de la SC ($V-$SC).

Axe 2 – Régulation du courant et de la tension

Le second axe porte sur l'évaluation des performances des boucles de régulation interne (courant) et externe (tension), afin d'analyser la stabilité et la précision du suivi des consignes malgré les perturbations de charge.

Les grandeurs étudiées sont :

- La **tension du bus DC** (V_{bus}), garantissant la stabilité d'alimentation de la charge ;
- Le **rapport cyclique de commande**, qui traduit l'adaptation instantanée du contrôle aux variations de la demande.

Cette structuration en deux axes, d'abord la coordination énergétique entre les sources, puis la qualité de la régulation, offre une vision complète de la performance du système hybride, couvrant à la fois l'efficacité stratégique et la précision dynamique.

Conformément à cette structuration, l'analyse débutera par le **premier axe**, consacré à la gestion d'énergie entre la pile à combustible et la supercapacité.

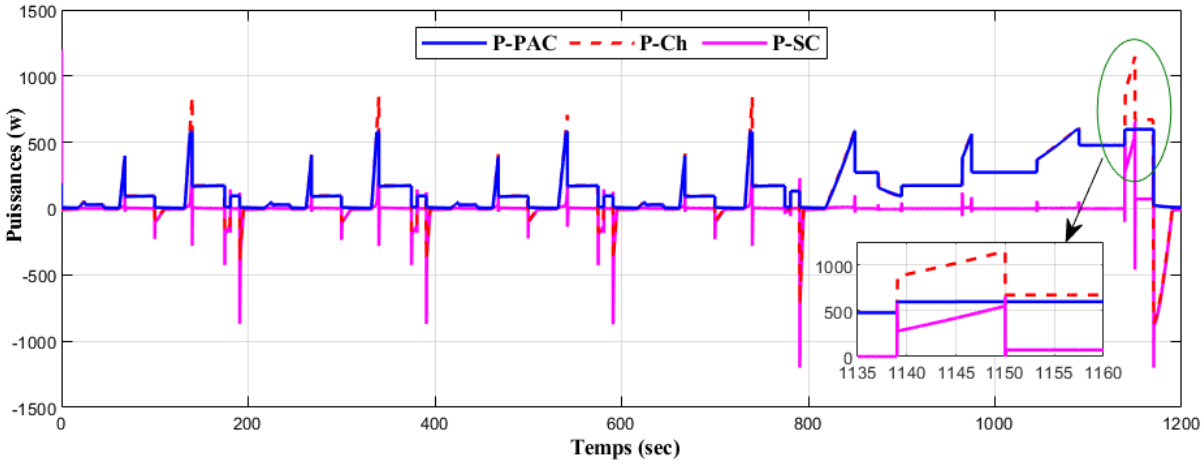


FIGURE III.4 : Évolution temporelle des puissances *P-PAC*,*P-Sc*, *P-Ch*

La figure III.4 met en évidence la coopération entre la pile à combustible (courbe bleue, *P-PAC*), la supercapacité (courbe magenta, *P-Sc*) et la charge (courbe rouge pointillée, *P-Ch*). On observe :

- La PAC fournit la *puissance moyenne* (trajectoire lissée, avec des paliers et des rampes limitées), tandis que la supercapacité prend en charge les *transitoires rapides* (pics positifs ou négatifs de forte amplitude).
- Lors des pointes de *P-Ch* (plusieurs occurrences sur l'intervalle 0–1200 s), *P-PAC* augmente de façon graduelle alors que *P-Sc* fournit instantanément la différence pour satisfaire la charge.
- Lorsque la puissance de charge devient négative (freinage ou restitution d'énergie), la supercapacité absorbe l'excédent (*P-Ch*), la PAC restant proche de zéro ou à un niveau réduit.
- **Zoom 1135–1165 s.** L'encart montre le comportement typique : au début de la rampe de *P-Ch*, *P-Sc* comble immédiatement l'écart, puis décroît au fur et à mesure que *P-PAC* atteint la consigne. Une fois l'équilibre atteint, la contribution de la SC se recentre proche de zéro ou passe négative pour se recharger.

Bilan de puissance au bus DC. En adoptant la convention de signes de la figure (puissance fournie >0, puissance absorbée <0), la *somme instantanée* des puissances des deux sources est, à chaque instant, égale à la puissance de la charge (à de faibles écarts près dus aux pertes et à l'échantillonnage des courbes) :

$$P\text{-}PAC(t) \;+\; P\text{-}Sc(t) \;\approx\; P\text{-}Ch(t). \tag{III.1}$$

En incluant explicitement les pertes des convertisseurs et du bus, l'égalité s'écrit

$$P\text{-}PAC(t) \;+\; P\text{-}Sc(t) \;=\; P\text{-}Ch(t) \;+\; P_{\text{pertes}}(t), \tag{III.2}$$

avec $P_{\text{pertes}}(t)$ généralement faible devant les trajectoires visibles. Cette cohérence vérifie le bon *transfert d'énergie* au bus DC et confirme que la stratégie de gestion d'énergie sollicite correctement la PAC pour la composante lente, tandis que la supercapacité gère les variations rapides et les épisodes régénératifs.

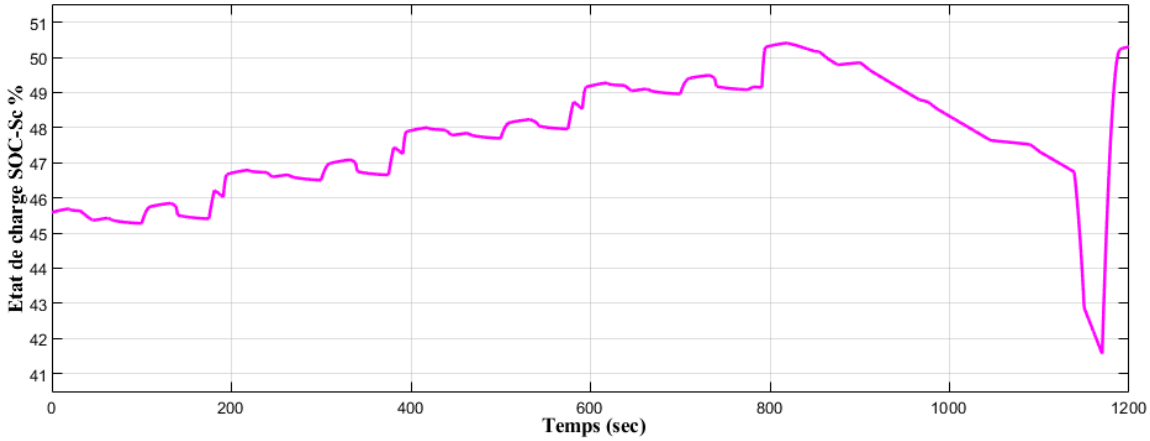


FIGURE III.5 : Évolution temporelle de l'état de charge de la supercapacité ($SOC - Sc$).

L'analyse de **la Figure III.5** met en évidence l'évolution du $SOC - Sc$ au cours du profil de simulation. Celui-ci présente des phases successives de recharge et de décharge, directement liées aux sollicitations énergétiques de la charge.

En croisant cette observation avec **la Figure III.4**, on remarque que :

- Les périodes de recharge correspondent aux instants où la puissance fournie par la PAC excède celle demandée par la charge, l'excédent étant stocké dans la SC.
- Lors des pics de demande de puissance, la SC se décharge rapidement pour fournir l'appoint nécessaire, ce qui se traduit par une baisse ponctuelle du SOC_{SC}.

Enfin, la chute rapide du $SOC - Sc$ en fin de simulation coïncide avec un pic de puissance de charge observé sur **la Figure III.4**, confirmant le rôle de la SC dans la gestion des transitoires rapides et le soutien de la stabilité du système.

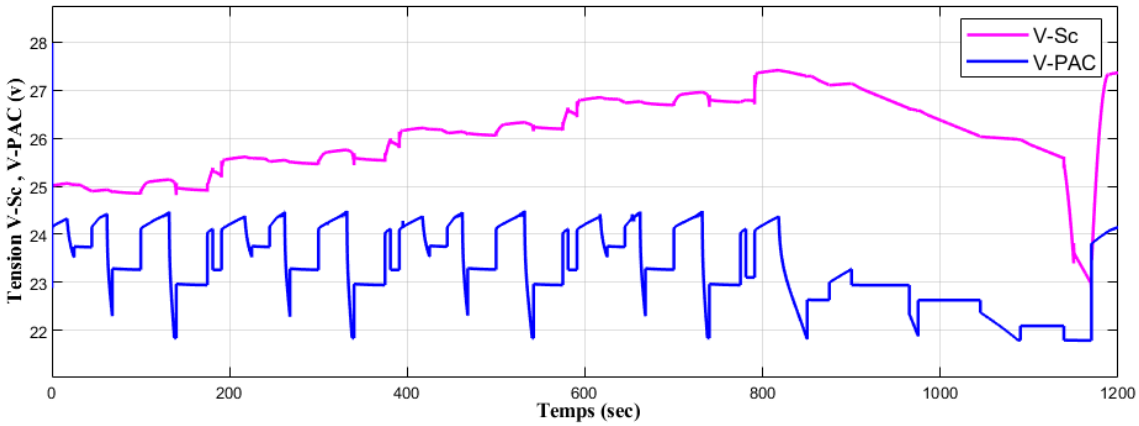


FIGURE III.6 : Évolution temporelle des tensions d'entrée : ($V - \text{Sc}$) et ($V - \text{PAC}$).

L'observation de **la Figure III.6** montre les variations temporelles des tensions $V - \text{Sc}$ et $V - \text{PAC}$ sur l'ensemble du cycle de simulation.

On constate que :

- La tension de la supercapacité (V_{SC}) suit une évolution directement corrélée à son état de charge (**Figure III.5**) : elle augmente lors des phases de recharge et diminue lors des phases de décharge rapide.
- La tension de la PAC (V_{PAC}) présente des variations en escalier, liées aux changements de régime de fonctionnement imposés par la stratégie de gestion d'énergie (**Figure III.4**). Ces variations correspondent aux ajustements de puissance fournie par la PAC.
- Les pics de décharge de la SC, identifiés par des chutes de V_{SC}, coïncident avec des augmentations ponctuelles de P_{SC} (**Figure III.4**) et une stabilisation de la contribution de la PAC.

Cette corrélation met en évidence la cohérence du comportement dynamique des sources : la PAC fournit une puissance continue adaptée à la charge moyenne, tandis que la SC répond aux variations rapides, ce qui se traduit simultanément dans les profils de puissance et dans les tensions d'entrée.

Après avoir examiné en détail la répartition énergétique entre la pile à combustible et la supercapacité, l'analyse se focalise à présent sur le **deuxième axe**, relatif aux performances des boucles de régulation interne (courant) et externe (tension).

La Figure III.5. présente l'évolution du taux de charge (SOC) de la supercapacité tout au long du cycle NEDC.

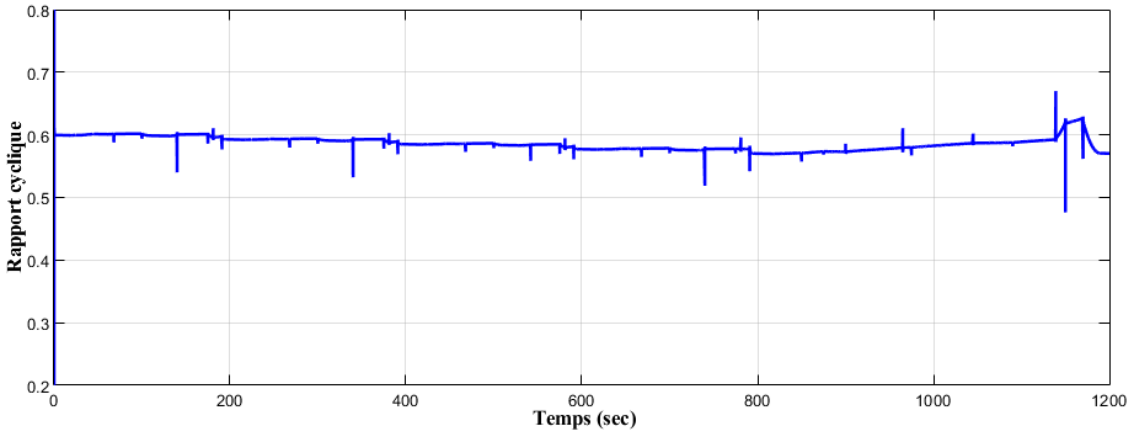


FIGURE III.7 : Évolution du rapport cyclique de commande durant la simulation

La Figure III.7 présente l'évolution du rapport cyclique de commande au cours de la simulation. On constate que la valeur du rapport cyclique se maintient globalement autour de 0.6, reflétant un fonctionnement stable du convertisseur dans sa plage nominale. Les variations ponctuelles correspondent aux instants où la demande de puissance change rapidement, ce qui entraîne des ajustements instantanés de la commande afin de maintenir la tension du bus DC (V_{bus}) proche de sa consigne (voir **Figure III.10**).

Ces ajustements rapides traduisent la **réactivité** du contrôleur, capable d'adapter en temps réel le rapport cyclique pour compenser les perturbations. Les excursions plus marquées observées en fin de simulation sont liées aux transitoires plus importants de charge, nécessitant une modification plus significative de la commande.

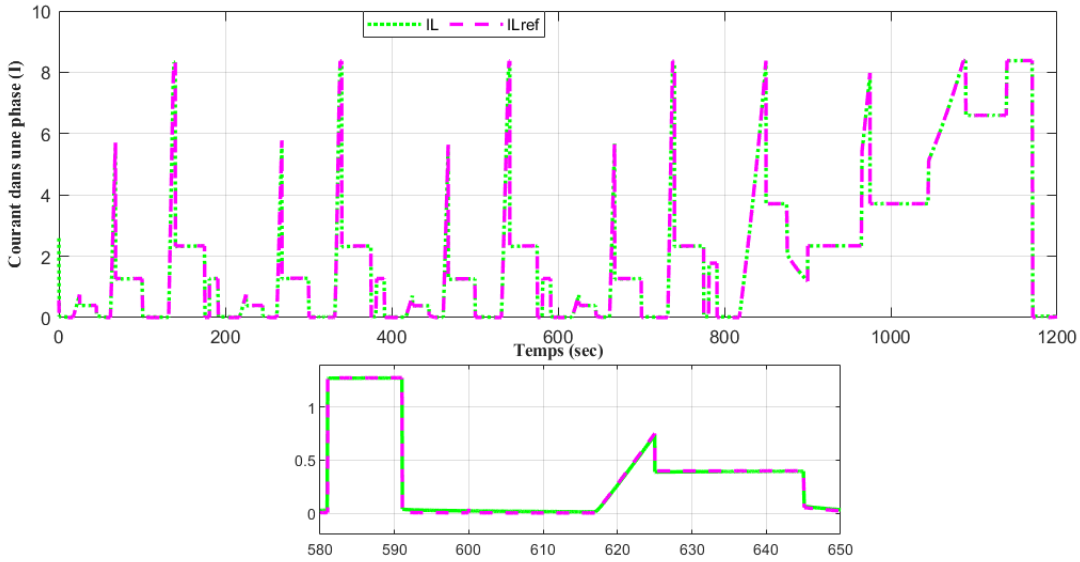


FIGURE III.8 : Courant inducteur d'une phase I_L et consigne I_{Lref} avec zoom sur un transitoire.

La Figure III.8 met en évidence la superposition quasi parfaite entre le courant inducteur I_L et sa consigne I_{Lref}, signe d'un *suivi précis* et d'une erreur de poursuite faible sur tout l'horizon simulé. Le zoom confirme une *dynamique rapide* sans dépassements marqués ni oscillations persistantes lors des changements de charge. Ce comportement valide l'efficacité du régulateur de courant, essentielle pour garantir un transfert de puissance fluide et limiter les contraintes sur les composants de puissance.

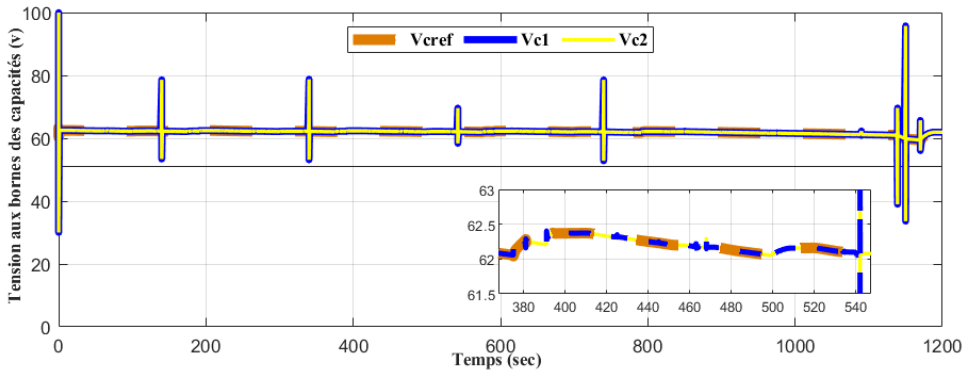


FIGURE III.9 : Tensions aux bornes des capacités V_{c1} et V_{c2} comparées à la consigne V_{cref} (zoom inclus).

La Figure III.9 met en évidence la réponse dynamique des tensions V_{c1} et V_{c2} par rapport à la consigne V_{cref}. On constate que les deux tensions suivent fidèlement la consigne malgré les sollicitations transitoires imposées par les variations de charge. Les écarts observés restent limités et s'amortissent rapidement, confirmant la robustesse de la *boucle de régulation en tension*. Le zoom illustre notamment la stabilisation autour de 62 V.

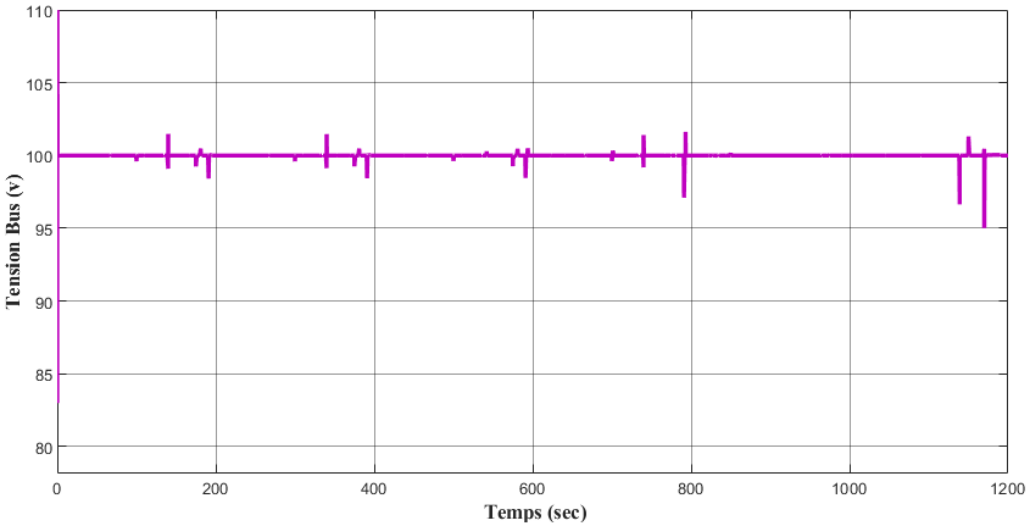


FIGURE III.10 : Évolution de la tension du bus DC V_{bus} durant la simulation

La Figure III.10 illustre l'évolution de la tension du bus DC (V_{bus}) au cours de la simulation. On rappelle ici que V_{bus} peut être exprimée comme la combinaison :

$$V_{\text{bus}} = V_{c1} + V_{c2} - V_{\text{entrée}} \tag{III.3}$$

Ainsi, la qualité du suivi observée pour V_{c1} et V_{c2} (**Figure III.9**) se traduit directement par une bonne régulation de V_{bus}. On observe que la tension du bus est globalement maintenue autour de sa consigne nominale de 100 V. Les écarts restent très faibles (quelques dixièmes de volt), hormis lors de variations rapides de charge, où de légères sur/sous-tensions apparaissent brièvement.

Ces fluctuations ponctuelles correspondent aux instants où la puissance demandée subit des changements rapides, comme cela a été montré dans la caractéristique des puissances (**Figure III.4**). La régulation corrige efficacement ces perturbations et ramène V_{bus} à sa valeur de consigne en un temps très court.

En résumé, l'analyse conjointe des **Figures III.9** et **III.10** confirme la cohérence et la complémentarité des boucles de régulation interne et externe : le bon suivi des tensions intermédiaires V_{c1} et V_{c2} conditionne directement la stabilité de V_{bus}, garantissant une alimentation fiable et robuste de la charge dans toutes les conditions de fonctionnement.

Dans l'ensemble, ces courbes confirmes que la stratégie de régulation implémentée assure un suivi précis des conditions de fonctionnement, tout en limitant les oscillations et en maintenant une stabilité globale du système.

III.2.1.4 Discussion

L'ensemble des résultats obtenus met en évidence un fonctionnement cohérent et performant du système hybride. Sur le plan de la répartition énergétique, la pile à combustible assure efficacement l'alimentation en puissance continue, tandis que la supercapacité joue pleinement son rôle de source tampon en répondant aux fluctuations rapides de la charge. Cette complémentarité se traduit par une somme des puissances délivrées par les deux sources en adéquation constante avec la puissance demandée par la charge, comme l'illustre la **Figure III.22**. L'évolution maîtrisée du SOC et des tensions des sources confirme le respect des objectifs de gestion énergétique et la bonne utilisation des ressources disponibles.

En ce qui concerne la stabilité et la précision du contrôle, les figures de la tension du bus DC (**Figure III.10**) et du rapport cyclique (**Figure III.7**) montrent que les consignes sont maintenues avec une grande régularité, malgré les variations de charge et les transitoires. Les ajustements opérés par le système de commande restent rapides, limités et stables, ce qui témoigne d'une conception robuste des boucles de régulation.

Ces observations confirment que la stratégie adoptée parvient à concilier *efficacité énergétique* et *stabilité dynamique*, garantissant ainsi un fonctionnement optimal dans des conditions variables.

La section suivante explore donc l'architecture hybride *Pile à combustible – Batterie*, mettant en œuvre une stratégie complémentaire, adaptée aux profils de puissance moins agressifs mais nécessitant un stockage énergétique plus conséquent.

III.2.2 Architecture PAC–Batterie

La deuxième configuration repose sur l'association d'une pile à combustible (PAC) et d'une batterie lithium-ion. Cette architecture vise à optimiser la gestion de l'énergie dans des conditions où la demande est soutenue sur des périodes prolongées. La PAC joue ici le rôle de source principale en fournissant une puissance en regime permanent, tandis que la batterie compense les variations intermédiaires et fournit une assistance lors des phases de surcharge.

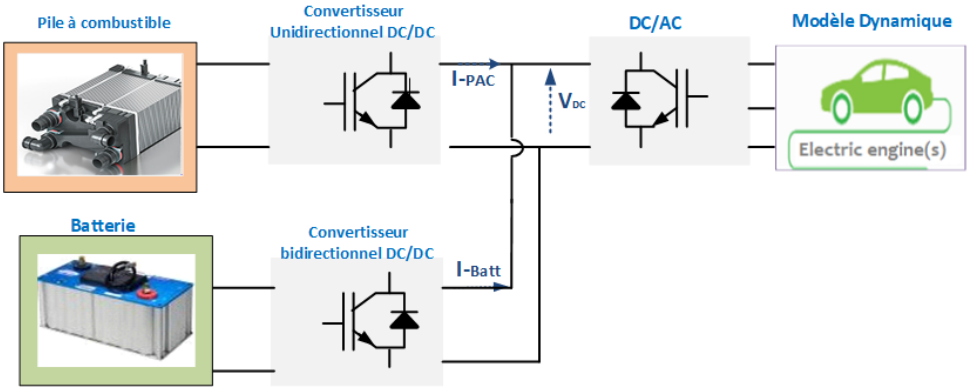


FIGURE III.11 : Architecture de la configuration PAC–Batterie

L'objectif de cette configuration est de libérer la pile à combustible durant les phases où la puissance requise dépasse sa capacité optimale, ou inversement, de stocker l'énergie excédentaire produite lorsque la charge est faible. Cette approche permet d'augmenter l'efficacité globale tout en prolongeant la durée de vie des composants [59].

III.2.2.1 Stratégie de gestion d'énergie PAC–Batterie

La stratégie adoptée est une logique déterministe hiérarchique qui vise (i) à exploiter la PAC dans une zone de fonctionnement efficiente et (ii) à confier à la batterie la prise en charge des écarts rapides entre la demande de puissance P_{charge} et la capacité instantanée de la PAC, tout en maintenant le SOC_{bat} dans une bande de sécurité. Deux situations sont distinguées : *traction* (puissance positive) et *régénération* (puissance négative).

Le principe est le suivant : la PAC est prioritairement régulée autour d'une plage admissible $[P_{\text{PAC,min}}, P_{\text{PAC,opt}}, P_{\text{PAC,max}}]$ afin de préserver rendement et durabilité, tandis que la batterie complète (ou absorbe) la différence selon son état de charge. Les seuils $SOC_{\text{bat,min}}$ et $SOC_{\text{bat,max}}$ pilotent les autorisations de décharge/charge de la batterie pour protéger sa longévité. Cette

coordination limite l'ondulation côté source, stabilise le bus DC et réduit la sollicitation de la PAC [177].

III.2.2.2 Implémentation algorithmique

L'algorithme prend en entrée P_{charge} et SOC_{bat}, et fournit les références $P_{\text{PAC_ref}}$ et $P_{\text{Bat_ref}}$. Il se résume à trois règles de haut niveau :

1. **Gestion de mode** : détection *traction/régénération* et activation des voies correspondantes (PAC en fourniture, batterie en appoint; ou batterie en absorption lorsque la récupération est permise).
2. **Priorité de la PAC** : contrainte de la PAC dans sa plage $[P_{\text{PAC,min}}, P_{\text{PAC,max}}]$ avec un point de fonctionnement préférentiel $P_{\text{PAC,opt}}$; la batterie compense l'écart, sous réserve des limites de puissance et de SOC.
3. **Protection par** SOC : si $SOC_{\text{bat}} < SOC_{\text{bat,min}}$, la décharge batterie est restreinte; si $SOC_{\text{bat}} > SOC_{\text{bat,max}}$, la charge est limitée. En demande faible, une recharge opportuniste contrôlée est possible pour préparer les transitoires futurs.

Cette synthèse correspond à l'organigramme de **la Figure III.12** et constitue la base de la commande embarquée validée en HIL [178].

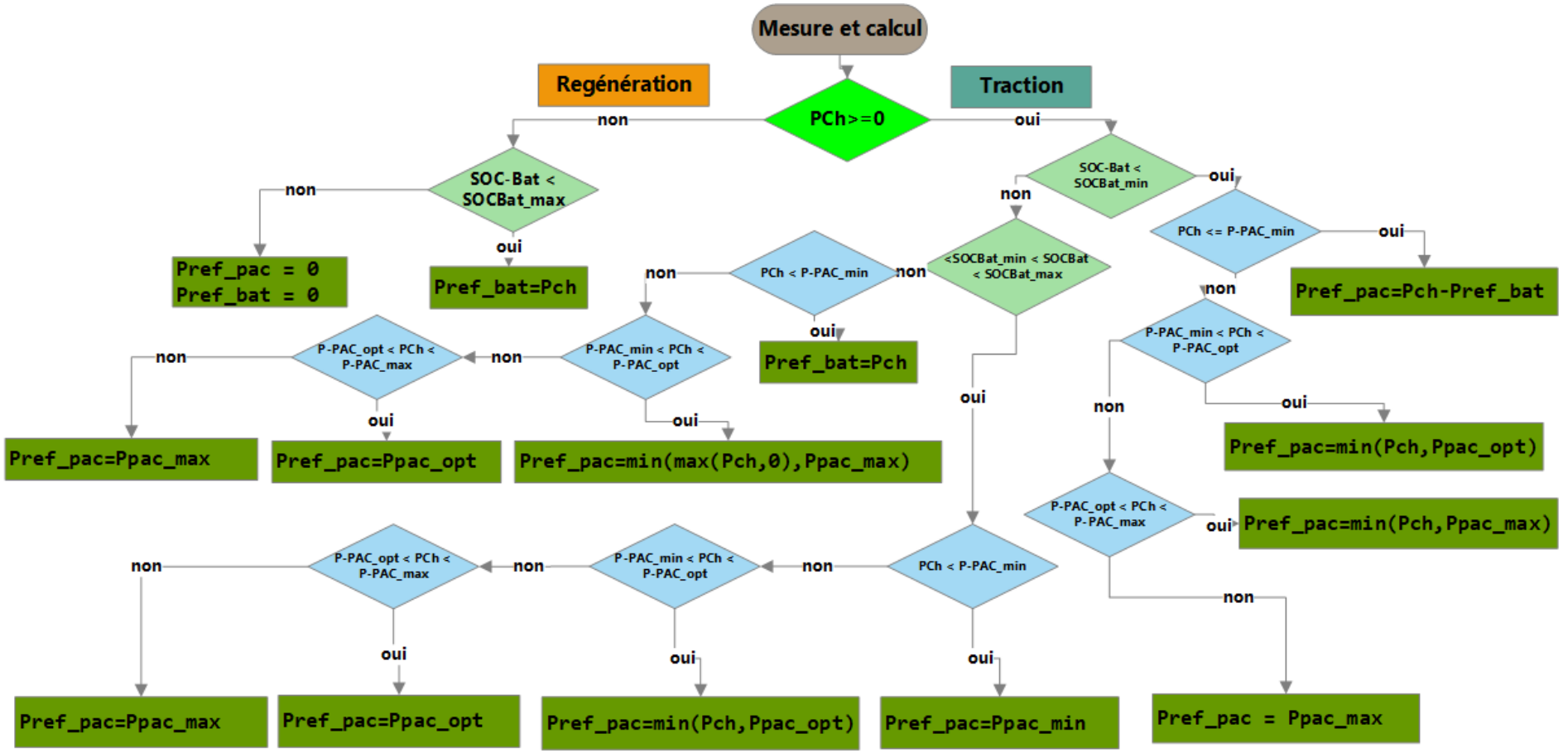


FIGURE III.12 : Algorithme de la stratégie de gestion d'énergie pour le système hybride PAC–batterie .

III.2.2.3 Résultats de simulation de l'architecture PAC–Batterie

L'architecture hybride couplant la pile à combustible (PAC) et la batterie lithium-ion vise à concilier continuité d'alimentation et stabilité du bus DC.
À l'instar de la configuration PAC–supercondensateur, l'analyse de la topologie PAC–batterie est également conduite selon deux axes complémentaires : (i) l'efficacité de la gestion énergétique, et (ii) la performance des boucles de régulation. Les figures suivantes illustrent la répartition des puissances, l'évolution du rapport cyclique, le suivi du SOC, les tensions d'entrée et enfin la tenue du bus DC.

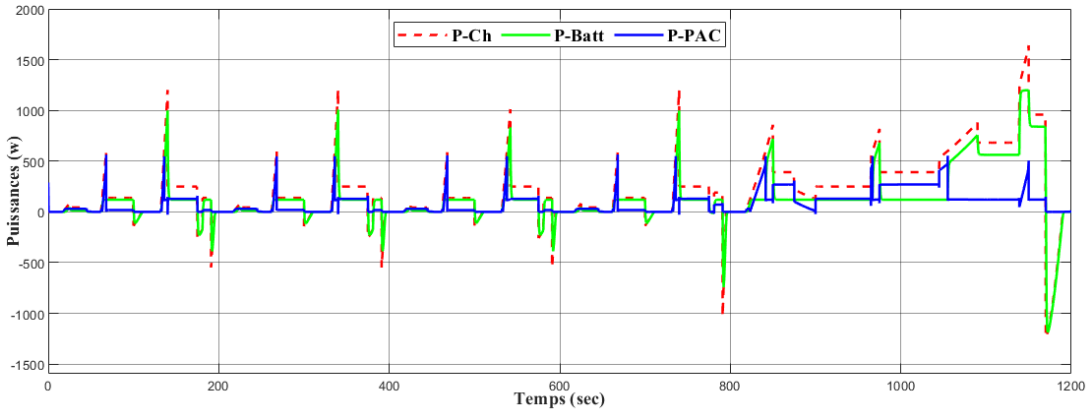


FIGURE III.13 : Évolution des puissances échangées entre la PAC (P_{PAC}), la batterie (P_{Batt}) et la charge (P_{Ch}) au cours du cycle NEDC.

La Figure III.13 illustre la dynamique des puissances au sein du système hybride PAC–batterie.

On constate que la **puissance de la charge** (P_{Ch}, en rouge pointillé) présente un profil fortement variable, représentatif des sollicitations d'un cycle de conduite (accélérations, freinages régénératifs et phases de croisière). Cette puissance oscille entre des valeurs positives lors des phases de traction et négatives lors des récupérations d'énergie.

La **pile à combustible** (P_{PAC}, en bleu) délivre une puissance relativement lissée et stable. Sa dynamique lente ne lui permet pas de suivre instantanément les variations rapides de la charge, mais elle assure l'essentiel de l'alimentation en régime permanent. Cette stabilité favorise son rendement et limite son vieillissement prématuré.

La **batterie** (P_{Batt}, en vert) compense les écarts entre la puissance de charge et celle fournie par la PAC. Deux cas principaux sont observés :

- lorsque $P_{\mathrm{Ch}} > P_{\mathrm{PAC}}$, la batterie fournit la puissance complémentaire afin de satisfaire la demande instantanée ;
- lorsque $P_{\mathrm{Ch}} < P_{\mathrm{PAC}}$, en particulier lors des freinages ($P_{\mathrm{Ch}} < 0$), elle absorbe l'excédent de puissance et se recharge.

Cette complémentarité entre la PAC et la batterie met en évidence une **stratégie de gestion d'énergie efficace** : la PAC fonctionne de manière stable et optimale, tandis que la batterie absorbe les transitoires rapides et assure les échanges bidirectionnels. Ainsi, la charge est alimentée de façon fiable tout au long du cycle, tout en préservant la durée de vie des sources et en améliorant le rendement global du système.

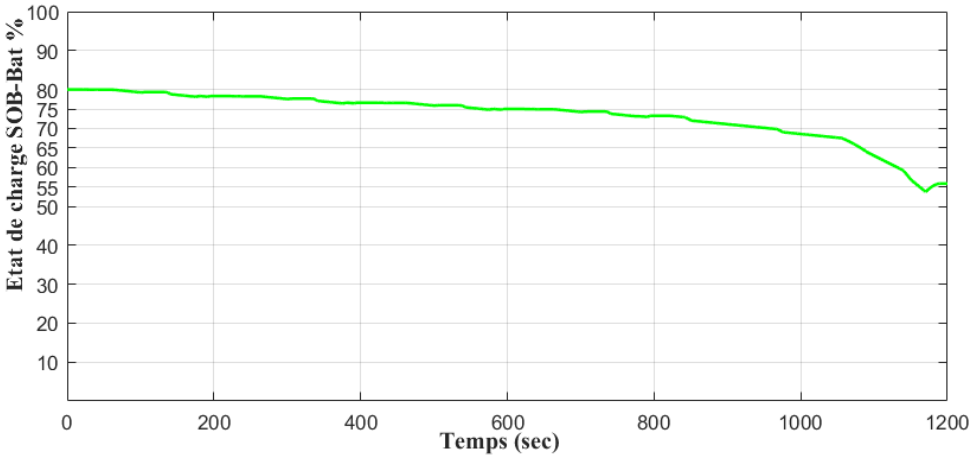


FIGURE III.14 : Évolution de l'état de charge de la batterie (SOC)

La Figure III.14 présente l'évolution de l'état de charge (*State of Charge* – SOC) de la batterie lors de la simulation de l'architecture hybride **pile à combustible / batterie** sous le profil de conduite standardisé NEDC. Ce graphe permet d'analyser la dynamique de décharge de la batterie en fonction de la sollicitation énergétique imposée par le profil de conduite. Au début de la simulation, le SOC est initialisé à environ 80 %, puis décroît de manière progressive tout au long du cycle. On observe une **phase de décharge modérée et relativement linéaire** entre 0 et 900 secondes, suggérant que la batterie fonctionne dans sa plage nominale de soutien, notamment lorsque la puissance demandée dépasse la capacité optimale de la pile à combustible. Cette évolution traduit un partage équilibré de la puissance entre les deux sources énergétiques, avec une préférence pour la PAC en fonctionnement stable. Une **chute plus prononcée du SOC** est visible entre 950 s et 1150 s, indiquant une augmentation significative de la demande de puissance, typique des phases d'accélération ou de vitesse élevée dans la phase extra-urbaine du NEDC. Durant cet intervalle, la batterie prend le relais pour compenser la limitation de la puissance maximale de la PAC. Enfin, une **légère remontée du SOC** apparaît en toute fin de simulation, aux alentours de 1180 s. Ce comportement peut être attribué à une récupération d'énergie par freinage régénératif ou à une baisse temporaire de la charge, permettant à la PAC de recharger partiellement la batterie. Globalement, cette courbe témoigne d'une **stratégie de gestion d'énergie efficace**, capable de maintenir le SOC de la batterie dans une plage de sécurité (Toujours entre SOC_{Min} et SOC_{Max})tout en optimisant l'utilisation des deux sources. L'évolution lisse et contrôlée du SOC reflète la pertinence de la répartition de puissance adoptée.

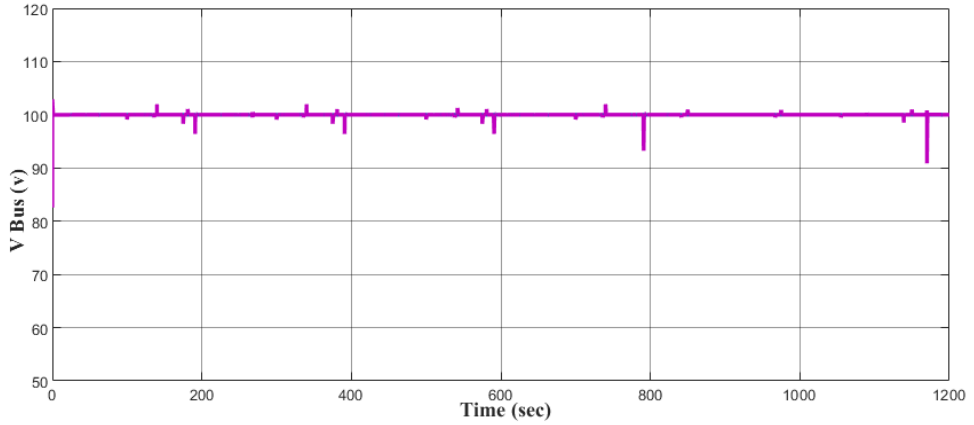


FIGURE III.15 : Évolution de la tension du bus DC V_{Bus} durant le cycle NEDC..

La Figure III.15 illustre la dynamique de la tension du bus continu V_{Bus} au cours du cycle de conduite NEDC. On constate que V_{Bus} est maintenue très proche de la valeur nominale de 100 V sur l'ensemble du profil. Cette stabilité confirme l'efficacité de la boucle externe de régulation de tension et la bonne coordination entre la pile à combustible et la batterie.

Les **écarts ponctuels**, visibles sous forme de brèves chutes (autour de 200 s, 600 s et 1150 s), correspondent à des variations rapides de la demande de puissance. Leur amplitude reste limitée (inférieure à 10 V) et la correction est quasi instantanée, ce qui traduit une excellente robustesse dynamique du système.

Dans l'ensemble, cette régulation stable garantit une alimentation fiable et continue du bus DC, condition indispensable pour préserver la qualité de l'énergie fournie à la charge et assurer le bon fonctionnement de l'architecture hybride PAC–batterie.

En synthèse, l'association PAC–batterie démontre une complémentarité efficace : la PAC assure l'alimentation principale en régime établi tandis que la batterie compense les sollicitations rapides, tout en stabilisant le bus DC. Cette double analyse (gestion énergétique et régulation) confirme la pertinence de l'architecture hybride et la solidité des stratégies de commande mises en œuvre.

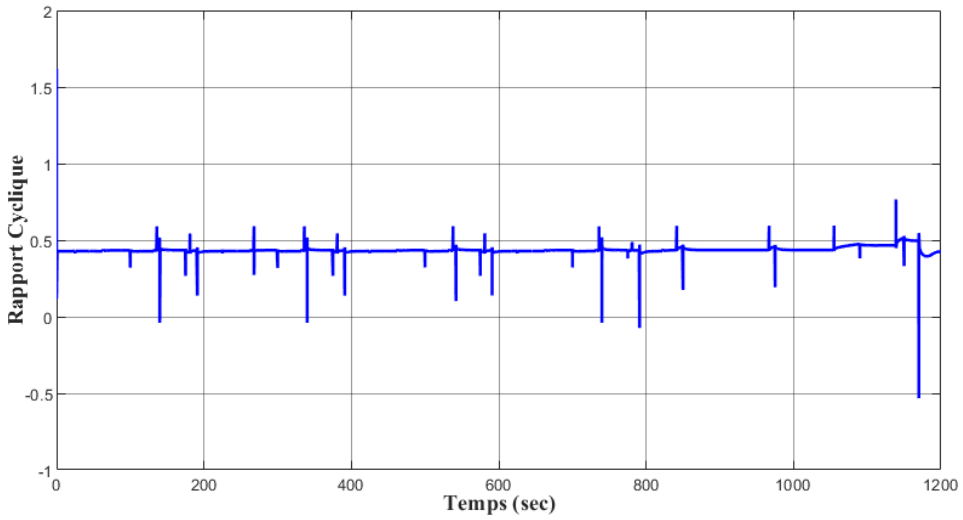


FIGURE III.16 : Rapport cyclique (duty cycle) du convertisseur PAC

La Figure III.16 illustre l'évolution temporelle du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé à la pile à combustible, dans le cadre du cycle de conduite NEDC. Globalement, on observe que le duty cycle oscille autour d'une valeur moyenne stable légèrement inférieure à 0.5, ce qui reflète une régulation efficace du transfert d'énergie entre la PAC et la charge ou la batterie. Les perturbations ponctuelles visibles sur la courbe correspondent aux phases transitoires du profil de conduite, telles que les accélérations soudaines ou les changements brusques de la puissance demandée. Malgré ces perturbations, l'amplitude des variations reste limitée, ce qui traduit une bonne réactivité du système de commande du convertisseur.

De plus, l'absence de dépassements critiques (valeurs supérieures à 1 ou inférieures à 0 en régime permanent) témoigne de la stabilité et de la fiabilité du fonctionnement PWM (modulation de largeur d'impulsion) dans les plages de fonctionnement prévues. Les pics négatifs très brefs pourraient être liés à des artefacts numériques (bruit de simulation ou inversion momentanée de direction de courant dans le modèle), mais ils ne semblent pas affecter la stabilité globale.

La commande du convertisseur permet un contrôle précis de la puissance transférée depuis la PAC, tout en maintenant un rapport cyclique globalement régulier, ce qui contribue à l'efficacité

énergétique et à la longévité des composants électroniques.

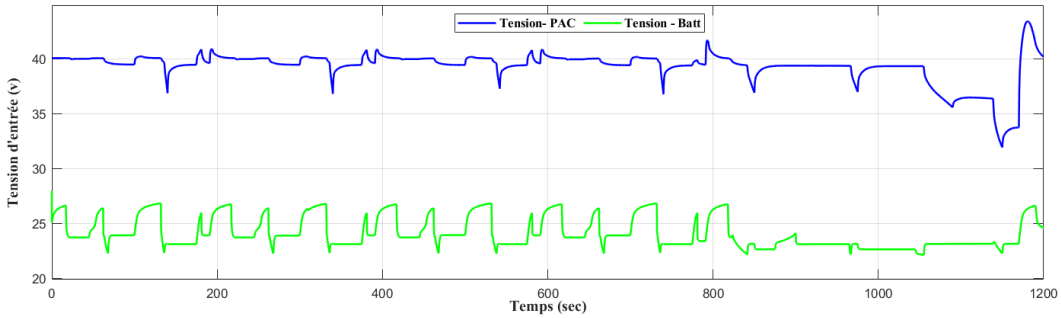


FIGURE III.17 : Évolution des tensions d'entrée de la PAC et de la batterie au cours de la simulation.

La Figure III.17 illustre l'évolution conjointe des tensions d'entrée de la PAC et de la batterie. Ces deux grandeurs traduisent directement l'équilibre énergétique instauré par la stratégie de gestion, et permettent de mettre en évidence les interactions dynamiques entre les deux sources.

La tension de la PAC se maintient globalement autour de 40 V, ce qui confirme son fonctionnement proche de la zone nominale. Les légères chutes observées coïncident avec les instants de forte sollicitation de la charge (voir **Figure III.13**), lorsque la PAC doit fournir un surcroît de puissance et que la batterie intervient en renfort. Cette corrélation souligne la complémentarité des deux sources : la PAC assure la continuité de l'alimentation en régime quasi-stationnaire, tandis que la batterie absorbe les fluctuations rapides.

La tension batterie, quant à elle, oscille entre 24 et 27 V, suivant ses cycles de charge et de décharge. Ces variations sont cohérentes avec l'évolution du SOC représentée en **Figure III.14**, qui met en évidence une diminution progressive de la réserve énergétique disponible. En particulier, les baisses ponctuelles de tension correspondent aux phases de décharge rapide où la batterie compense un déficit temporaire de la PAC, alors que certaines hausses traduisent des phases de moindre sollicitation, voire de recharge indirecte.

En fin de cycle (après $t \approx 1000$ s), la tension de la PAC présente une instabilité plus marquée, liée à la saturation progressive de la batterie et à une augmentation de la demande de puissance. Cette situation se reflète dans la courbe des puissances (**Figure III.13**), où l'on constate des amplitudes de transfert plus importantes. Néanmoins, la tension du bus DC (**Figure III.15**) demeure régulée autour de 100 V, preuve de l'efficacité de la boucle de contrôle externe qui compense les fluctuations des deux sources.

En résumé, l'évolution conjointe des tensions PAC et batterie valide la robustesse de la gestion d'énergie proposée : la PAC fonctionne de manière stable dans sa plage nominale, tandis que la batterie assure un rôle de tampon dynamique, garantissant la stabilité globale du système hybride et la tenue du bus DC.

Les résultats mettent en évidence une coordination efficace entre la pile à combustible, opérant dans sa zone optimale, et la batterie, sollicitée lors des transitoires ou pour absorber les excès d'énergie. La régulation conjointe de la tension du bus DC et des courants sources assure une stabilité satisfaisante du système.

Dans l'ensemble, ces résultats valident les choix de modélisation et de stratégie de gestion d'énergie adoptés. Une comparaison approfondie avec l'architecture triplement hybride PAC–Batterie–Supercapacité sera présentée dans la section suivante, afin d'évaluer les gains supplémentaires en matière de stabilité, de réactivité et de longévité des composants.

III.3 Système hybride à trois sources

La configuration à trois sources constitue une solution avancée pour répondre aux besoins énergétiques variés des véhicules électriques hybrides. Cette architecture repose sur l'intégration coordonnée d'une pile à combustible (PAC), d'une batterie lithium-ion et d'une supercapacité. Chaque source remplit un rôle spécifique dans la gestion de l'énergie, permettant d'exploiter au mieux les caractéristiques dynamiques et énergétiques de chacune [179].

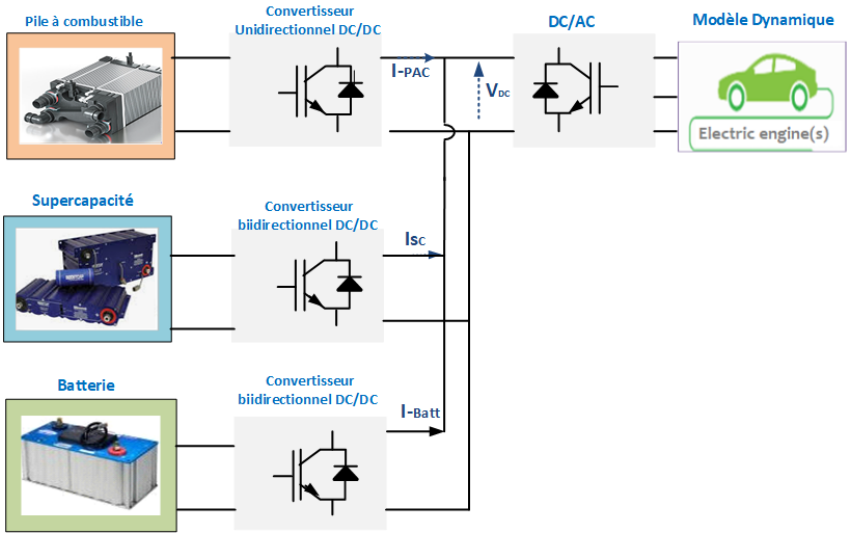


FIGURE III.18 : Schéma d'architecture d'un système hybride multi-sources.

La pile à combustible assure l'alimentation principale du système grâce à sa densité énergétique élevée. Cependant, en raison de sa réponse lente aux variations de charge, elle doit être assistée par des sources secondaires plus réactives. La batterie intervient dans les phases de demande soutenue ou modérée, comme les trajets longs ou les phases de récupération d'énergie. Quant à la supercapacité, elle est sollicitée pour absorber ou fournir rapidement les pics de puissance, grâce à sa très faible constante de temps [180].

Le système de gestion d'énergie, basé sur une logique déterministe, alloue dynamiquement la puissance entre les sources selon leur état de charge (SOC), les conditions de fonctionnement et les exigences du profil de conduite. L'objectif est de prolonger la durée de vie des composants tout en assurant une autonomie suffisante et une réponse rapide aux sollicitations transitoires.

La modélisation de cette configuration est réalisée sous MATLAB/Simulink. Chaque source est reliée à un convertisseur DC/DC commandé par des régulateurs PI, avec une stratégie hiérarchisée à double boucle : régulation du courant par phase et régulation globale de la tension du bus continu. Les scénarios simulés permettent de valider l'efficacité de la gestion d'énergie avant son implantation en temps réel sur la plateforme HIL OPAL-RT, décrite au chapitre suivant.

Cette configuration tripartite offre une réponse énergétique robuste et intelligente, favorisant une gestion optimale dans des environnements exigeants et variables.

III.3.1 Stratégie de gestion d'énergie

La logique de gestion se poursuit par la distinction entre les deux modes principaux de fonctionnement, traction et régénération, comme illustré en **figure III.19**. Après l'acquisition des données et les calculs nécessaires, un test est appliqué sur la puissance de charge P_{ch}. Si $P_{ch} > 0$, le système fonctionne en mode traction ; dans le cas contraire, il bascule en mode régénération. Cette étape, bien que simple, constitue la base de l'architecture décisionnelle et conditionne

l'activation des processus détaillés dans les étapes suivantes, en lien direct avec les tableaux de gestion.

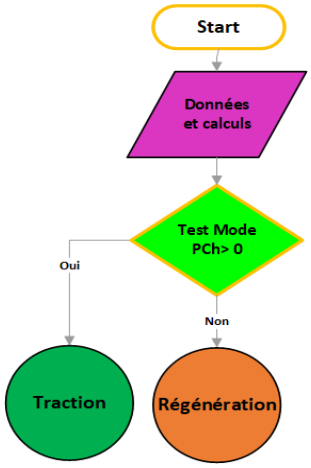
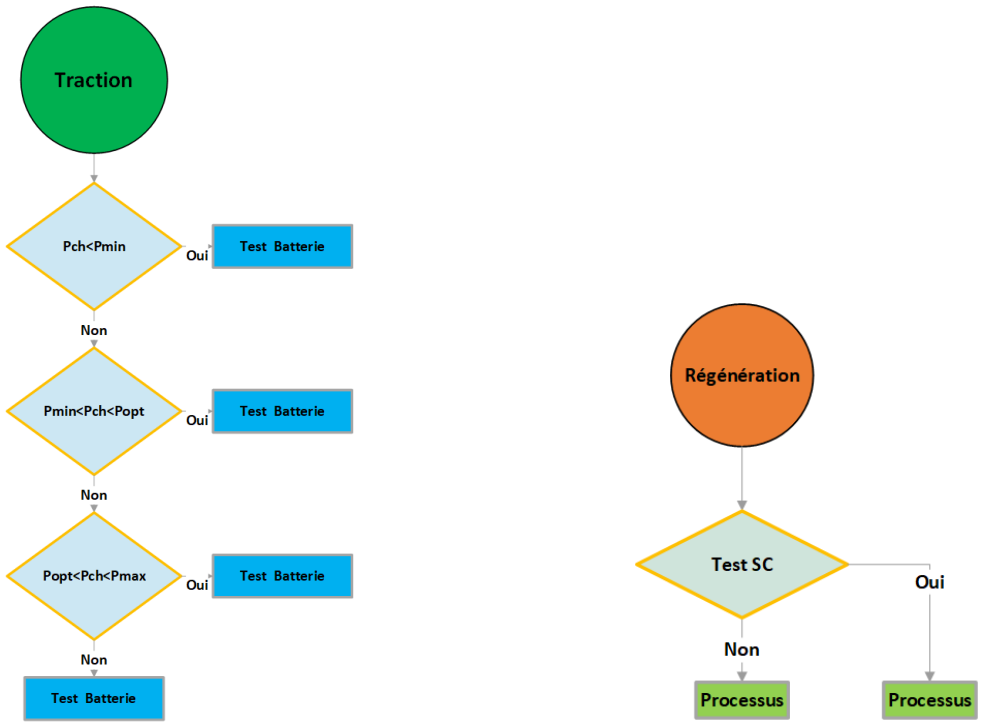


FIGURE III.19 : Transition entre traction et régénération selon le signe de la puissance P_{ch}.

En mode traction, la logique représentée en **figure III.20** s'applique. La puissance demandée est comparée à trois seuils caractéristiques de la pile à combustible ($P_{\min}$, P_{opt} et $P_{\max}$). Lorsque $P_{ch} < P_{\min}$, la batterie assure seule l'alimentation du système. Si $P_{\min} < P_{ch} < P_{\text{opt}}$, la PAC fonctionne dans sa zone optimale de rendement avec un soutien minimal de la batterie. Lorsque $P_{\text{opt}} < P_{ch} < P_{\max}$, la PAC est assistée par la batterie pour répondre à la demande croissante. Enfin, si $P_{ch} > P_{\max}$, la batterie devient la source dominante afin de protéger la PAC d'une surcharge. Cette hiérarchisation illustre le rôle central de la PAC dans la fourniture de la puissance moyenne et celui de la batterie comme source de soutien.



(a) Organigramme de gestion d'énergie en mode traction

(b) Organigramme de gestion d'énergie en mode régénération

FIGURE III.20 : Organigrammes de gestion d'énergie : (a) traction et (b) régénération.

En mode régénération, la logique décrite en **figure III.20** s'active. L'énergie issue des phases de freinage ou de décélération est d'abord dirigée vers la supercapacité, qui l'absorbe en priorité si son état de charge est compris dans une fenêtre admissible. Si cette condition n'est pas satisfaite, la batterie prend le relais et stocke l'énergie récupérée. La supercapacité joue ainsi son rôle de tampon haute puissance, tandis que la batterie assure le stockage secondaire afin de préserver sa durabilité.

Afin de sécuriser l'utilisation des sources, des tests spécifiques sont réalisés sur la batterie et la supercapacité, comme représenté en **figure III.21**. La batterie est sollicitée uniquement si son état de charge reste compris entre $SOC_{\text{Batt-min}}$ et $SOC_{\text{Batt-max}}$, ce qui évite les décharges profondes et les surcharges. De la même manière, la supercapacité n'est activée que si son SOC est compris entre $SOC_{\text{sc-min}}$ et $SOC_{\text{sc-max}}$. Ces tests agissent comme un filtre décisionnel, validant ou non la disponibilité des sources et assurant ainsi une exploitation robuste dans le respect des contraintes de durabilité.

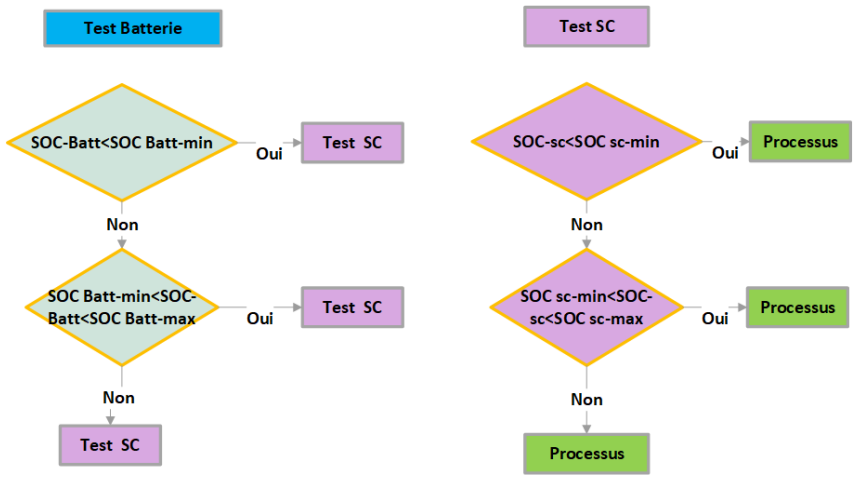


FIGURE III.21 : Tests de validation SOC pour la batterie et la supercapacité.

L'ensemble de ces règles est synthétisé dans le tableau III.2, qui associe directement les conditions de fonctionnement (plages de SOC et de puissance) aux processus activés. Les organigrammes traduisent visuellement cette logique, tandis que le tableau en donne une lecture systématique et structurée. La PAC fournit la puissance moyenne dans sa zone optimale, la supercapacité absorbe et restitue les transitoires rapides, et la batterie assure le rôle de soutien et de continuité. Cette complémentarité permet de concilier rendement énergétique, stabilité dynamique et longévité des composants [181, 182].

Tableau III.2: Tableau récapitulatif des processus de gestion selon les conditions de puissance et de SOC.

Condition	Source active	Processus	Remarque
$P_{ch} < P_{\text{min}}$	Batterie	Traction	PAC éteinte
$P_{\text{min}} < P_{ch} < P_{\text{opt}}$	PAC + Batt. (appoint)	Traction	PAC en zone optimale
$P_{\text{opt}} < P_{ch} < P_{\text{max}}$	PAC + Batt.	Traction	Soutien batterie
$P_{ch} > P_{\text{max}}$	Batterie	Traction	Protection PAC

Continued on next page

Tableau III.2: Tableau récapitulatif des processus de gestion selon les conditions de puissance et de SOC. (Continued)

Condition	Source active	Processus	Remarque
$\mathrm{SOC}_{\mathrm{SC,min}} < \mathrm{SOC}_{\mathrm{SC}} < \mathrm{SOC}_{\mathrm{SC,max}}$	SC	Régénération	Absorption des transitoires
$\mathrm{SOC}_{\mathrm{SC}} \notin [\mathrm{SOC}_{\mathrm{SC,min}}, \mathrm{SOC}_{\mathrm{SC,max}}]$	Batterie	Régénération	Stockage secondaire
$\mathrm{SOC}_{\mathrm{Batt,min}} < \mathrm{SOC}_{\mathrm{Batt}} < \mathrm{SOC}_{\mathrm{Batt,max}}$	Batterie	Traction/Régénérat	Utilisation validée
$\mathrm{SOC}_{\mathrm{Batt}} \notin [\mathrm{SOC}_{\mathrm{Batt,min}}, \mathrm{SOC}_{\mathrm{Batt,max}}]$	—	—	Batterie protégée

Les tableaux ci-après constituent la déclinaison opérationnelle des organigrammes introduits aux **figures III.19** (basculement traction/régénération), **III.20** (branches *Traction* (a) et *Régénération* (b) sur une même ligne) et **III.21** (tests de disponibilité Batterie/SC). Ils fournissent, pour chaque bande de puissance demandée P_{ch} et pour chaque combinaison d'états de charge, les références de puissance allouées à la pile à combustible Pref_{fc}, à la batterie Pref_{ba} et à la supercapacité Pref_{sc}. Les lignes indexent l'état de la **batterie** (bas, nominal, haut), les colonnes indexent l'état de la **supercapacité** (bas, nominal, haut). L'intersection (ligne, colonne) donne la triple allocation $(\mathrm{Pref}_{fc}, \mathrm{Pref}_{ba}, \mathrm{Pref}_{sc})$.

Cas 1 — $P_{\mathrm{ch}} < P_{\mathrm{min}}$ **(faible demande).** Conformément à **la figure III.20(a)**, la PAC n'est pas forcée au-delà du nécessaire ; la **batterie** assure la traction si elle est disponible. Lorsque la **batterie est basse**, certaines cases prévoient une légère élévation de Pref_{fc} (termes de type $P_{\mathrm{ch}} + P_{\mathrm{bat_ch}}$) pour *recharger* la batterie sans solliciter la SC. Si la **SC est haute**, elle peut décharger ($\mathrm{Pref}_{sc} = P_{\mathrm{ch}}$) pour revenir dans sa fenêtre, ce qui soulage à la fois la PAC et la batterie. Lorsque la **SC** ou la **batterie** sont hors fenêtre, les cases imposent naturellement $\mathrm{Pref} = 0$ pour la source protégée, conformément aux tests de **la figure III.21**.

Tableau III.3 : Répartition des puissances pour $P_{\mathrm{ch}} < P_{\mathrm{min}}$

$P_{\mathrm{ch}} < P_{\mathrm{min}}$			
Test Batterie \ Test SC	$\mathrm{SOC}_{sc} < \mathrm{SOC}_{sc}^{\mathrm{min}}$	$\mathrm{SOC}_{sc}^{\mathrm{min}} < \mathrm{SOC}_{sc} < \mathrm{SOC}$	$\mathrm{SOC}_{sc} > \mathrm{SOC}_{sc}^{\mathrm{max}}$
$\mathrm{SOC}_{bat} < \mathrm{SOC}_{bat}^{\mathrm{min}}$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}} + P_{\mathrm{bat_ch}}$ $\mathrm{Pref}_{ba} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = 0$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}}$ $\mathrm{Pref}_{ba} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = 0$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = 0$ $\mathrm{Pref}_{ba} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$
$\mathrm{SOC}_{bat}^{\mathrm{min}} < \mathrm{SOC}_{bat} < \mathrm{SOC}_{bat}^{\mathrm{max}}$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}} + P_{\mathrm{bat_ch}}$ $\mathrm{Pref}_{ba} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = 0$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}}$ $\mathrm{Pref}_{ba} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = 0$	$\mathrm{Pref}_{sc} = P_{\mathrm{ch}}$ $\mathrm{Pref}_{fc} = 0$ $\mathrm{Pref}_{ba} = 0$
$\mathrm{SOC}_{bat} > \mathrm{SOC}_{bat}^{\mathrm{max}}$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}} + P_{\mathrm{bat_ch}}$ $\mathrm{Pref}_{ba} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = 0$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}} + P_{\mathrm{sc_ch}}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$ $\mathrm{Pref}_{ba} = 0$	$\mathrm{Pref}_{fc} = P_{\mathrm{ch}}$ $\mathrm{Pref}_{ba} = P_{\mathrm{ch}} - \mathrm{Pref}_{fc}$ $\mathrm{Pref}_{sc} = 0$

Cas 2 — $P_{\min} < P_{\text{ch}} < P_{\text{opt}}$ **(zone optimale PAC).** Selon **la figure III.20(a)**, la **PAC** travaille à rendement élevé (proche de P_{opt}). Les tableaux traduisent ceci par $\text{Pref}_{fc} = \min(P_{\text{ch}}, P_{\text{opt}})$. L'éventuel *complément* $(P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc})$ est confié à la **batterie** si la SC est indisponible, ou à la **SC** si elle est dans sa fenêtre (réponse rapide, réduction des transitoires). Lorsque la **batterie** est basse et la **SC** disponible, on privilégie la SC en appoint pour préserver l'état de la batterie, en accord avec la logique de protection de **la figure III.21**.

TABLEAU III.4 : Répartition des puissances pour $P_{\min} < P_{\text{ch}} < P_{\text{opt}}$

$P_{\min} < P_{\text{ch}} < P_{\text{opt}}$			
Test Batterie \ **Test SC**	$\text{SOC}_{sc} < \text{SOC}_{sc}^{\min}$	$\text{SOC}_{sc}^{\min} < \text{SOC}_{sc} < \text{SOC}$	$\text{SOC}_{sc} > \text{SOC}_{sc}^{\max}$
$\text{SOC}_{bat} < \text{SOC}_{bat}^{\min}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{ch}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$
$\text{SOC}_{bat}^{\min} < \text{SOC}_{bat} < \text{SOC}_{bat}^{\max}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{ch}} + P_{\text{bat_ch}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = \min(P_{\text{ch}}, P_{\text{opt}})$ $\text{Pref}_{sc} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{ba} = 0$	$\text{Pref}_{sc} = P_{\text{ch}} - P_{\min}$ $\text{Pref}_{fc} = \min(P_{\text{ch}}, P_{\min})$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $-\text{Pref}_{sc}$
$\text{SOC}_{bat} > \text{SOC}_{bat}^{\max}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{ch}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{sc} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{ba} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$

Cas 3 — $P_{\text{opt}} < P_{\text{ch}} < P_{\max}$ **(demande élevée).** La **PAC** reste le contributeur principal mais ne couvre plus seule la demande ; le surplus $(P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc})$ est alors assuré par la **batterie** et/ou la **SC** selon leur disponibilité. Lorsque la **SC** est dans sa fenêtre, elle prend prioritairement la part dynamique (Pref_{sc}) afin d'amortir les transitoires, tandis que la **batterie** fournit le fond de panier énergétique (Pref_{ba}). Si la **SC** est haute, certaines cases prescrivent son *déstockage* contrôlé pour la ramener dans la fenêtre admissible, ce qui renforce la robustesse des transitions (cohérent avec la branche (b) régénération de **la figure III.20** lorsque le signe de puissance s'inverse localement).

TABLEAU III.5 : Répartition des puissances pour $P_{\text{opt}} < P_{\text{ch}} < P_{\text{max}}$

$P_{\text{opt}} < P_{\text{ch}} < P_{\text{max}}$			
Test Batterie \ **Test SC**	$\text{SOC}_{sc} < \text{SOC}_{sc}^{\min}$	$\text{SOC}_{sc}^{\min} < \text{SOC}_{sc} < \text{SOC}$	$\text{SOC}_{sc} > \text{SOC}_{sc}^{\max}$
$\text{SOC}_{bat} < \text{SOC}_{bat}^{\min}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{ch}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$
$\text{SOC}_{bat}^{\min} < \text{SOC}_{bat} < \text{SOC}_{bat}^{\max}$	$\text{Pref}_{fc} = \min(P_{\text{ch}}, P_{\text{opt}})$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = \min(P_{\text{ch}}, P_{\min})$ $\text{Pref}_{sc} = \max(P_{\text{ch}} - P_{\text{opt}} - P_{\text{bat_ch}}, 0)$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc} - \text{Pref}_{sc}$	$\text{Pref}_{fc} = 0$ $\text{Pref}_{sc} = \min(P_{\text{ch}}, P_{\text{opt}})$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{sc}$
$\text{SOC}_{bat} > \text{SOC}_{bat}^{\max}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{opt}}$ $\text{Pref}_{sc} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{ba} = 0$

Cas 4 — $P_{\text{ch}} > P_{\text{max}}$ **(saturation PAC).** Conformément à la protection figurée dans **III.20(a)**, la **PAC** est limitée à P_{max} ($\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$). L'excédent est fourni par la **batterie** si son SOC est nominal/haut, et/ou par la **SC** lorsque sa fenêtre le permet. Les cellules où la **SC** est dans la fenêtre allouent une part significative à Pref_{sc} pour encaisser le pic, tandis que la **batterie** complète la composante plus lente. Si la **batterie** est basse, l'appoint bascule préférentiellement vers la **SC**; si la **SC** est hors fenêtre, la **batterie** devient prioritaire, dans le respect des règles de **la figure III.21**.

TABLEAU III.6 : Répartition des puissances pour $P_{\text{ch}} > P_{\text{max}}$

$P_{\text{ch}} > P_{\text{max}}$			
Test Batterie \ **Test SC**	$\text{SOC}_{sc} < \text{SOC}_{sc}^{\min}$	$\text{SOC}_{sc}^{\min} < \text{SOC}_{sc} < \text{SOC}$	$\text{SOC}_{sc} > \text{SOC}_{sc}^{\max}$
$\text{SOC}_{bat} < \text{SOC}_{bat}^{\min}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{ba} = 0$ $\text{Pref}_{sc} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{sc} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{ba} = 0$
$\text{SOC}_{bat}^{\min} < \text{SOC}_{bat} < \text{SOC}_{bat}^{\max}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{sc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = 0$ $\text{Pref}_{sc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{sc}$
$\text{SOC}_{bat} > \text{SOC}_{bat}^{\max}$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{ba} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{sc} = 0$	$\text{Pref}_{fc} = P_{\text{max}}$ $\text{Pref}_{sc} = P_{\text{ch}} - \text{Pref}_{fc}$ $\text{Pref}_{ba} = 0$

Au total, la lecture conjointe $\{figures\} \rightarrow \{tables\}$ montre que le test *traction/régénération* de **la figure III.19** distribue vers les deux branches alignées de **la figure III.20**, et que les tests Batterie et tests SC (**figure III.21**) sélectionnent, cellule par cellule, la combinaison $(\text{Pref}_{fc}, \text{Pref}_{ba}, \text{Pref}_{sc})$ qui respecte les fenêtres de SOC tout en maintenant la PAC au plus près

de sa zone de rendement. On obtient ainsi une coopération hiérarchisée : la **PAC** fournit la puissance moyenne (zones $[P_{\min}, P_{\text{opt}}]$ et $[P_{\text{opt}}, P_{\max}]$), la **SC** traite les transitoires quand sa fenêtre le permet, et la **batterie** assure le soutien énergétique et la continuité, avec protections automatiques lorsque les SOC sortent de leurs intervalles.

III.3.2 Résultats de simulation

De manière analogue aux configurations précédentes, l'analyse de l'architecture tripartite PAC–batterie–supercondensateur s'articule autour de deux volets :

1. l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie,
2. la performance des boucles de régulation assurant la stabilité du système.

Les résultats de simulation sont présentés à travers plusieurs indicateurs :

- la répartition des puissances entre les trois sources et la charge,
- l'évolution du rapport cyclique des convertisseurs,
- le suivi des états de charge (SOC) de la batterie et du supercondensateur,
- les profils de tension aux bornes des sources,
- et enfin la tenue du bus DC face aux sollicitations du cycle de conduite.

Ces éléments permettent d'apprécier la capacité de la configuration hybride à maintenir un fonctionnement stable tout en exploitant de façon optimale la complémentarité des trois sources.

Ces résultats illustrent la capacité de l'hybridation tripartite à concilier rendement global, stabilité de fonctionnement et protection des composants.

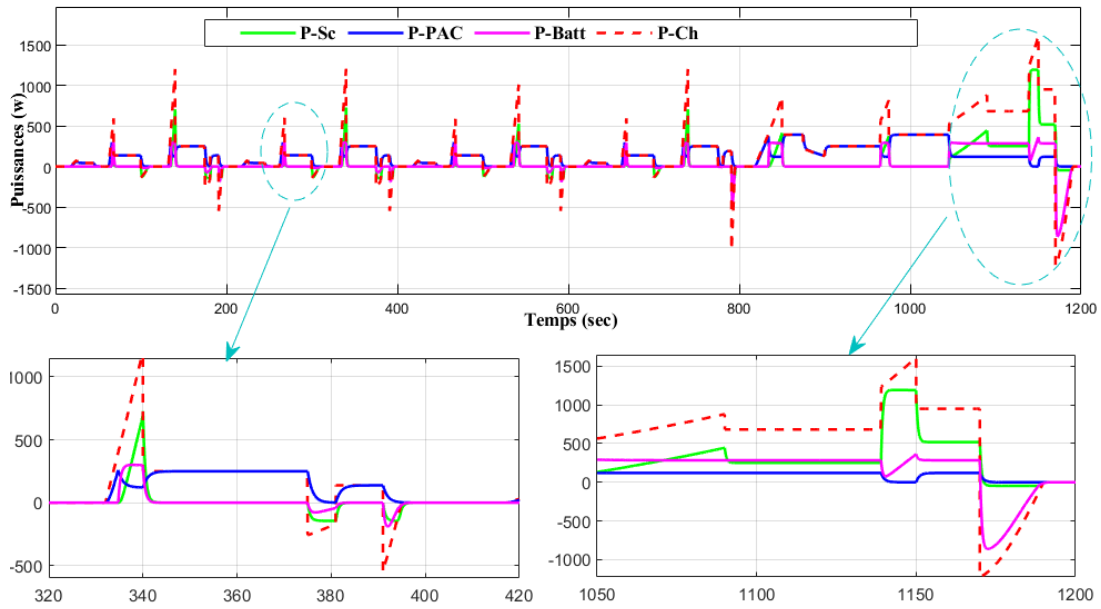


FIGURE III.22 : Répartition des puissances entre PAC, supercapacité, batterie et charge

La Figure III.22 illustre la répartition dynamique des puissances entre la pile à combustible (PAC), la batterie, la supercapacité (SC) et la charge au cours du cycle de conduite. On constate que la somme des puissances fournies par les trois sources

$$P_{\text{PAC}} + P_{\text{Batt}} + P_{\text{SC}} \approx P_{\text{charge}},$$

ce qui confirme la cohérence énergétique de l'architecture hybride.

Deux comportements caractéristiques apparaissent :

- **Lors des sollicitations rapides (pics de puissance)**, la supercapacité se décharge brutalement pour répondre instantanément à la demande, comme observé autour de $t \approx 790$ s et $t \approx 1150$ s. Ces pics positifs traduisent son rôle de source tampon à haute dynamique. La batterie contribue également en soutien, en délivrant une puissance positive afin de stabiliser le bus DC. La PAC, plus lente, augmente progressivement son apport mais demeure centrée sur l'alimentation de fond.

- **Lors des phases de relâchement de la charge**, la supercapacité et la batterie basculent en **mode recharge** (puissances négatives). À $t \approx 795$ s, on observe une récupération énergétique où la SC absorbe un excédent important, suivie d'une recharge progressive de la batterie. Ce phénomène se reproduit après le pic de $t \approx 1160$ s, où les deux sources se reconstituent en exploitant le surplus fourni par la PAC.

Les zooms intégrés dans la figure confirment ces transitions rapides : - Autour de $t \approx 790$ **s**, la supercapacité absorbe et restitue très rapidement l'énergie, tandis que la batterie suit avec une dynamique plus amortie. - En **fin de cycle** ($t \approx 1150$–**1170 s**), la complémentarité est maximale : la SC délivre un pic intense, la batterie assure un soutien régulier, puis toutes deux passent en recharge coordonnée lorsque la charge chute.

Ainsi, cette gestion dynamique met en évidence un fonctionnement synergique :
- la **PAC** couvre le socle énergétique,
- la **batterie** assure un rôle de réserve intermédiaire en charge/décharge,
- la **supercapacité** compense instantanément les variations brusques.

Ce mécanisme garantit non seulement la continuité d'alimentation mais aussi une meilleure longévité de la batterie, qui est préservée des sollicitations rapides grâce au rôle tampon de la supercapacité.

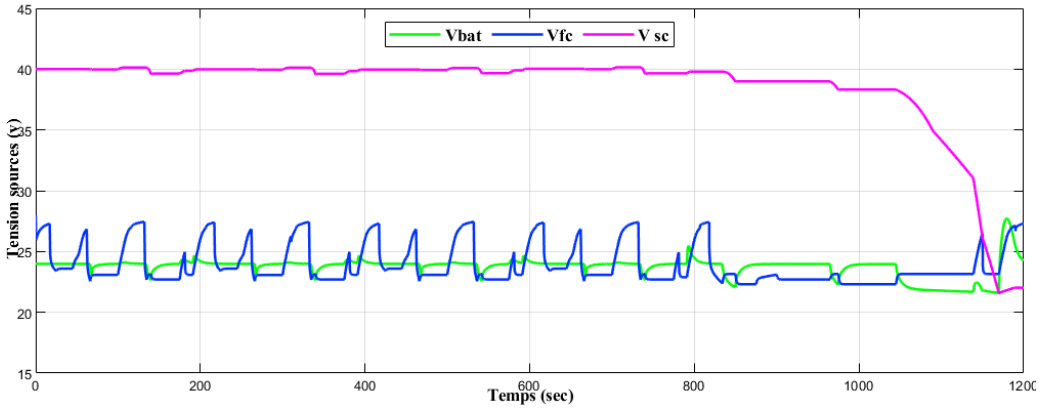


FIGURE III.23 : Évolution des tensions aux bornes de la supercapacité, de la pile à combustible et de la batterie dans l'architecture triplement hybride.

La Figure III.23 illustre l'évolution temporelle des tensions aux bornes des trois sources d'énergie : la supercapacité (V_{SC}), la pile à combustible (V_{PAC}), et la batterie lithium-ion (V_{Batt}), dans le cadre d'une architecture hybride combinant les trois technologies.

On observe que la tension de la supercapacité demeure globalement stable autour de 42 V pendant les phases de forte demande, assurant ainsi un rôle tampon très réactif face aux variations

rapides de charge. Cette dynamique est cohérente avec les propriétés intrinsèques des supercondensateurs, dont la densité de puissance élevée permet une réponse immédiate aux fluctuations de courant [183, 45, 184].

La pile à combustible maintient une tension relativement constante (∼26 V) pendant les périodes de fonctionnement soutenu, contribuant de manière stable à la fourniture d'énergie moyenne. Cependant, des variations transitoires apparaissent lorsque la charge impose des changements brusques de régime, soulignant la nécessité d'un couplage avec des éléments à réponse plus rapide, comme la batterie ou la supercapacité [185, 186].

La batterie, quant à elle, joue un rôle complémentaire en absorbant ou restituant de l'énergie lors des phases de transition, ce qui se traduit par des fluctuations plus marquées de sa tension. Sa capacité à intervenir sur des durées intermédiaires permet d'assurer l'équilibre énergétique et de réduire la sollicitation de la pile à combustible [187].

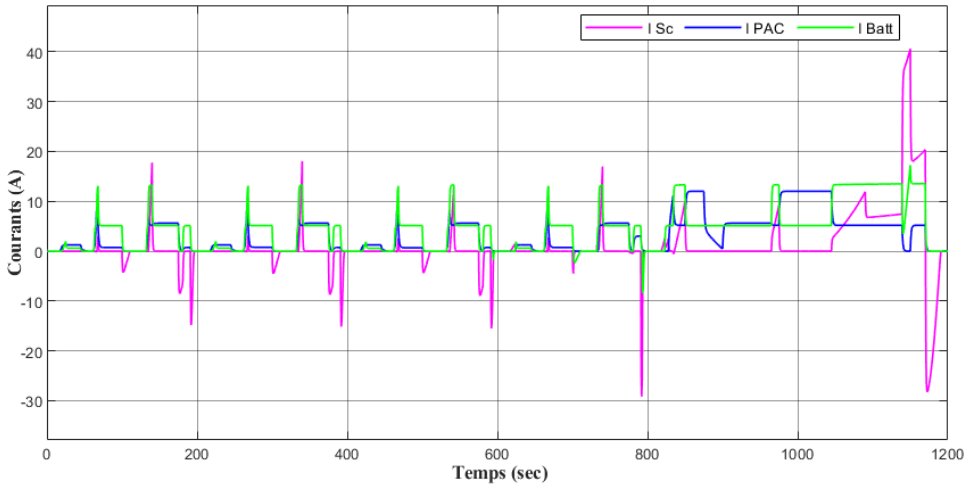


FIGURE III.24 : Courants dans les trois sources hybrides (I_{SC}, I_{PAC}, I_{Bat})

La Figure III.24 montre les courants délivrés respectivement par la supercapacité (I_{Sc}), la pile à combustible (I_{PAC}) et la batterie (I_{Bat}). On observe que :

- Le courant I_{Sc} (rose) présente des oscillations marquées entre des valeurs positives et négatives, traduisant les phases alternées de charge et décharge.

- Le courant I_{PAC} (bleu) reste relativement constant et modéré, signe que la PAC assure en priorité l'alimentation moyenne.

- Le courant I_{Bat} (vert) présente une dynamique intermédiaire et participe à la compensation des pics lorsque la supercapacité atteint ses limites.

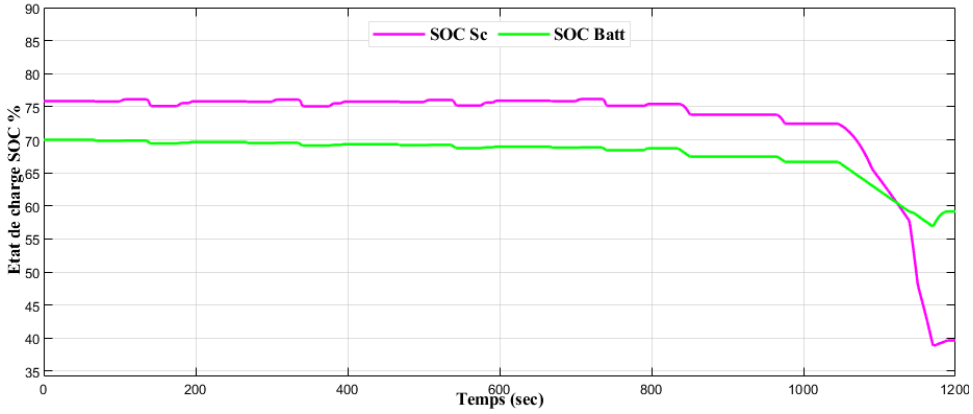


FIGURE III.25 : Évolution du SOC de la batterie et de la supercapacité

La Figure III.25 illustre l'évolution des états de charge de la batterie (SOC_{Batt}) et de la supercapacité (SOC_{SC}) au cours du cycle de conduite. Ces évolutions sont directement corrélées à la dynamique des puissances analysée dans **la Figure III.22**.

On observe que le SOC_{Batt} (courbe verte) décroît progressivement de près de 70 % à environ 40 % sur l'intervalle simulé. Cette tendance traduit son rôle de réserve intermédiaire sollicitée de manière soutenue lors des phases de forte charge. La diminution s'accélère particulièrement après $t \approx 1000$ s, en cohérence avec les pointes de puissance mises en évidence dans les zooms de **la Figure III.22**. Toutefois, cette décharge reste confinée entre $SOC_{\text{min}} \approx 40\%$ et $SOC_{\text{max}} \approx 70\%$, garantissant une exploitation sécurisée de la batterie et préservant sa durée de vie.

Le SOC_{SC} (courbe rose), quant à lui, reste globalement stabilisé autour d'un niveau élevé (75–85 %), avec des variations rapides correspondant aux alternances de charge et de décharge. Les fluctuations marquées en fin de cycle (entre $t \approx 1050$ et 1200 s) reflètent des sollicitations intenses lors des pics de puissance, suivies d'une recharge immédiate grâce à l'excédent fourni par la PAC. Le maintien du SOC_{SC} dans une plage restreinte entre $SOC_{\text{min}} \approx 75\%$ et $SOC_{\text{max}} \approx 85\%$ confirme son rôle de tampon haute dynamique, toujours prêt à répondre aux transitoires rapides.

En comparaison des **Figures III.22** et **III.25**, on constate que :

- La **batterie** fournit un soutien régulier mais son SOC diminue graduellement, restant toutefois contrôlé entre SOC_{min} et SOC_{max}.

- La **supercapacité** alterne charge et décharge rapides, avec un SOC oscillant dans une fenêtre étroite, assurant la réactivité nécessaire aux pics de puissance.

Ainsi, le maintien des deux sources dans des plages d'opération prédéfinies valide l'efficacité de la stratégie de gestion énergétique, en assurant à la fois la satisfaction des besoins de la charge et la protection des éléments de stockage.

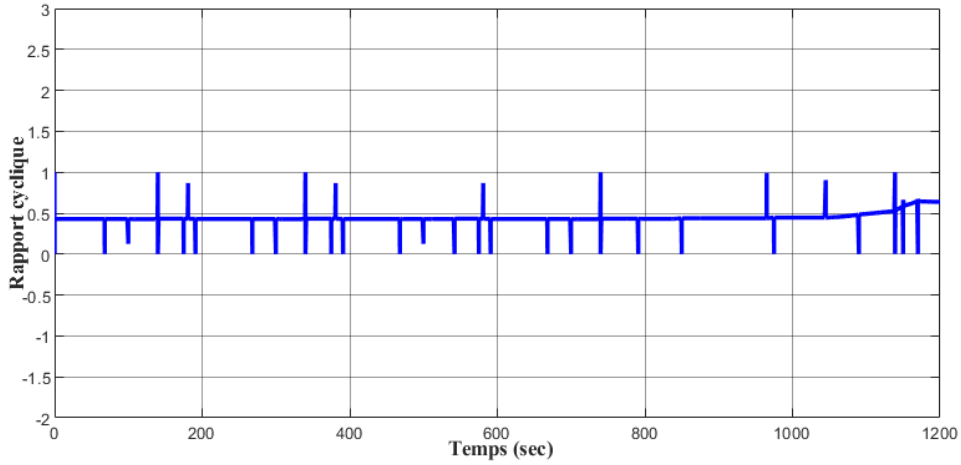


FIGURE III.26 : Évolution du rapport cyclique (duty cycle) appliqué aux convertisseurs

La Figure III.26 illustre l'évolution du rapport cyclique associé à la commande PWM des convertisseurs. On constate que celui-ci reste globalement contenu dans une plage restreinte, ce qui témoigne de la **stabilité du système de commande** malgré la forte variabilité de la demande en puissance (voir **Figure III.22**).

Les petites fluctuations observées correspondent principalement aux phases transitoires, lors des **pics de charge** ou des alternances rapides entre la décharge et la recharge de la supercapacité et de la batterie. Ces oscillations traduisent l'adaptation instantanée des convertisseurs pour assurer la continuité de l'alimentation du bus DC.

Il est également important de souligner que le maintien du rapport cyclique dans des bornes modérées limite les contraintes de commutation, réduisant ainsi les pertes de conversion et préservant la durée de vie des composants de puissance. Ce comportement, corrélé aux évolutions de *SOC* (**Figure III.25**), confirme que la stratégie de gestion adoptée permet d'obtenir un fonctionnement **stable, efficace et bien coordonné** entre les trois sources hybrides.

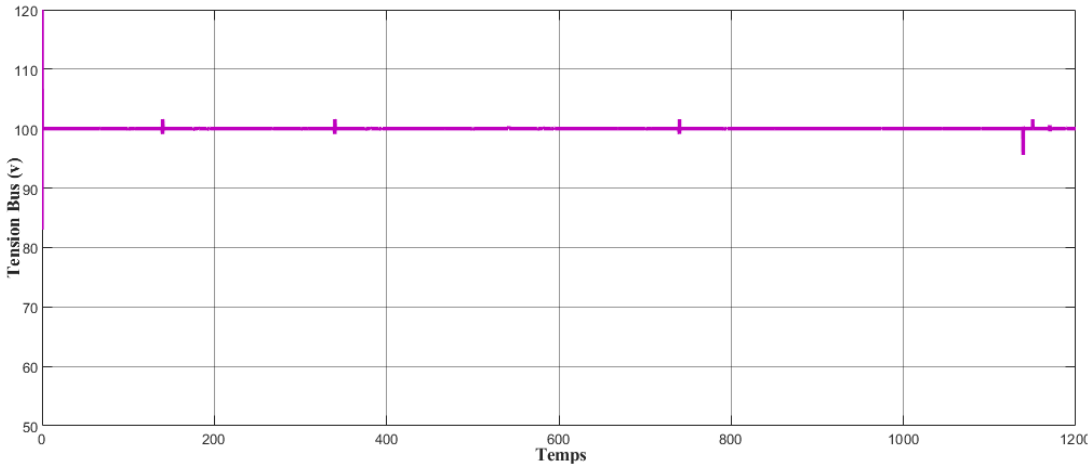


FIGURE III.27 : Tension du bus continu V_{bus}

La Figure III.27 illustre l'évolution de la tension du bus continu V_{bus} au cours du cycle de conduite. On observe que la tension est maintenue autour de la consigne fixée à 100 V, avec seulement de faibles écarts lors des transitions rapides de charge.

Ces variations ponctuelles correspondent aux **pics de puissance** identifiés précédemment (**Figure III.22**), où la supercapacité et la batterie interviennent conjointement pour compenser

l'inertie de la PAC. Leur réactivité permet d'amortir les perturbations et d'assurer une stabilisation quasi immédiate de V_{bus}.

La régulation reste ainsi **robuste et efficace**, puisque même lors des sollicitations intenses (voir zooms autour de $t \approx 800$ s et $t \approx 1150$ s), la tension du bus ne s'écarte que très légèrement de sa valeur de consigne. Ce comportement confirme l'efficacité de la stratégie de gestion énergétique et la bonne coordination des sources hybrides.

En définitive, la figure démontre que l'architecture PAC–batterie–supercapacité permet de garantir une **qualité de tension élevée** sur le bus DC, critère essentiel pour la stabilité et la fiabilité du système d'alimentation.

III.3.3 Analyse comparative des stratégies de gestion énergétique et mise en valeur de l'hybridation tri-sources

Les résultats de simulation obtenus pour les différentes configurations hybrides mettent en évidence la pertinence de la démarche adoptée. Dans le cas de l'architecture **PAC–SC**, la supercapacité assure une réponse ultrarapide aux sollicitations transitoires, permettant de compenser efficacement l'inertie de la PAC. Toutefois, cette configuration reste limitée pour les profils de conduite de longue durée, la capacité énergétique réduite de la supercapacité ne garantissant pas une autonomie suffisante et n'ayant qu'un effet marginal sur la consommation globale d'hydrogène.

L'association **PAC–batterie** apporte une amélioration notable. La batterie permet d'absorber et de restituer une énergie significative, tout en maintenant une stabilité du bus DC grâce à son rôle d'intermédiaire énergétique. Cette hybridation présente un bon compromis entre continuité d'alimentation et réserve énergétique. Néanmoins, la batterie, soumise à des cycles répétés de charge/décharge rapides, peut voir sa durée de vie électrochimique réduite si elle n'est pas soutenue par une source dynamique. Par ailleurs, bien que cette architecture améliore déjà la consommation spécifique d'hydrogène, elle ne permet pas toujours d'exploiter la PAC dans sa zone optimale de rendement.

C'est précisément ce rôle que joue la configuration **PAC–batterie–SC**. En intégrant simultanément une réserve énergétique de moyen terme (batterie) et une réserve ultrarapide (supercapacité), cette topologie exploite la complémentarité des sources :

- la PAC fournit la puissance moyenne et assure la continuité d'alimentation, en maintenant un fonctionnement proche de son point de rendement optimal, ce qui réduit la consommation d'hydrogène,
- la batterie prend en charge les échanges énergétiques intermédiaires et se recharge régulièrement grâce à la PAC, ce qui limite l'accumulation de cycles profonds et améliore sa durée de vie,
- la supercapacité absorbe les pics de puissance et restitue l'énergie lors des phases transitoires, protégeant ainsi la batterie d'un vieillissement prématuré et garantissant un allègement des contraintes dynamiques.

La régulation de la tension du bus DC et des courants de chaque source reste stable dans les trois cas, mais elle est nettement **plus robuste dans l'architecture à trois sources**. Comme le montrent les résultats, les fluctuations de V_{bus} demeurent limitées à quelques volts autour de la consigne de 100 V, même lors des perturbations sévères de charge. De plus, les zooms effectués mettent en évidence la bonne coordination entre charge et décharge des sources, confirmant l'efficacité du schéma de gestion hiérarchique basé sur des règles déterministes.

En comparaison avec les approches rapportées dans la littérature, ces résultats confirment les travaux récents soulignant l'intérêt des architectures hybrides multi-sources pour les applications de mobilité électrique et de micro-réseaux [188, 15, 189, 190]. La combinaison PAC–batterie–SC se distingue par :

- une **réduction des contraintes dynamiques** sur la batterie, améliorant sa longévité,
- une **optimisation de la consommation d'hydrogène** grâce au maintien de la PAC dans sa zone de haut rendement,
- une **amélioration de l'efficacité énergétique globale**,
- une **meilleure qualité de régulation**, garantissant la stabilité des tensions et courants même lors de perturbations rapides.

Ainsi, la stratégie hiérarchique proposée permet non seulement de répondre aux contraintes énergétiques mais également de préserver la durée de vie des composants et d'optimiser l'utilisation de l'hydrogène, ressource centrale du système. La pertinence de la troisième hybridation valide pleinement la démarche suivie, en conciliant stabilité, performance dynamique, rendement énergétique et fiabilité.

Ces résultats ouvrent la voie à une analyse plus fine des comportements internes, notamment à travers la mise en œuvre d'**observateurs d'état** dédiés. L'intégration d'un observateur en mode glissant permettra, dans la suite, d'estimer avec précision l'état de charge et de santé de la batterie, ainsi que de détecter d'éventuels défauts internes, renforçant ainsi la robustesse et la sûreté du système hybride.

III.4 Surveillance du système

Les résultats obtenus dans les sections précédentes confirment la pertinence des stratégies de gestion d'énergie développées pour des architectures hybrides à deux et trois sources. La répartition dynamique des puissances entre la pile à combustible, la batterie et la supercapacité permet d'assurer la stabilité de la tension du bus DC et d'optimiser la sollicitation de chaque source selon ses caractéristiques dynamiques et énergétiques.

Cependant, pour garantir la fiabilité globale du système, il est indispensable d'intégrer une couche de supervision capable de détecter d'éventuelles défaillances, notamment au niveau des sources de stockage. La batterie, bien que stable à court terme, reste vulnérable à certains défauts critiques tels que les erreurs de mesure de tension et les courts-circuits internes, pouvant compromettre à la fois la sécurité et les performances énergétiques.

Dans cette optique, la suite de ce travail s'intéresse à la mise en œuvre d'un **observateur en mode glissant** permettant d'estimer en temps réel l'état de charge (SOC) de la batterie, même en présence de perturbations ou d'incertitudes. Cette estimation robuste sera ensuite utilisée pour la détection et l'identification de deux types de défauts :

- **Défaut de capteur de tension batterie**, qui fausse la mesure directe de V_{bat} ;
- **Défaut de court-circuit interne**, modélisé par une résistance parasite évolutive au sein de la cellule.

III.5 Motivation et contexte

Dans les systèmes électroénergétiques embarqués, et en particulier dans les véhicules hybrides ou électriques, la supervision de l'état interne des composants est indispensable pour garantir un fonctionnement sûr et optimal. La batterie, qui constitue une source d'énergie centrale, est soumise à des contraintes dynamiques importantes. Parmi ses grandeurs caractéristiques, l'état de charge (SOC) joue un rôle essentiel dans la stratégie de gestion d'énergie, influençant directement les décisions de partage de puissance entre les différentes sources.

Cependant, la mesure directe du SOC n'est pas possible ; elle doit être estimée à partir de mesures indirectes telles que la tension, le courant ou la température. Or, ces capteurs sont souvent affectés par des bruits, des dérives lentes ou des défauts soudains (court-circuit, rupture, etc.), ce qui compromet la fiabilité des estimations.

Dans ce contexte, il devient nécessaire d'introduire des techniques de supervision avancées, capables de compenser l'incertitude des mesures et de détecter d'éventuels défauts. Les observateurs non linéaires, notamment en mode glissant, constituent une réponse robuste à ces problématiques. Ils permettent à la fois d'estimer précisément le SOC malgré les incertitudes, et de détecter en temps réel les défauts critiques tels qu'un défaut de tension ou un court-circuit interne.

Cette section introduit donc la transition entre la gestion d'énergie décrite dans les parties précédentes et la mise en œuvre d'un module de surveillance robuste basé sur l'observation en mode glissant.

III.6 Synthèse de l'observateur

L'estimation en ligne de l'état de charge (SOC) d'une batterie est essentielle pour garantir la sécurité, la longévité et les performances des systèmes hybrides. Parmi les méthodes non linéaires, l'observateur par mode glissant (Sliding Mode Observer, SMO) est particulièrement apprécié pour sa robustesse face aux incertitudes paramétriques, au bruit de mesure et aux défauts de capteurs. Un exemple d'application est donné par Meng [129], où un observateur (T-S) est utilisé pour l'estimation en ligne dans un modèle de batterie lithium-ion.

Le modèle de la batterie avec défaut de court-circuit s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_f f(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + D_f f(t). \end{cases} \tag{III.4}$$

- $x(t) \in \mathbb{R}^n$: vecteur d'état (tension batterie, SOC, tension V_1, V_2)
- $u(t) \in \mathbb{R}^m$: entrée connue $\rightarrow I_{\text{batt}}$
- $f(t)$: défaut

III.6.1 Observateur à mode glissant

Ce formalisme est particulièrement adapté pour le suivi de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH) des batteries lithium-ion. En effet, le SMO permet non seulement d'améliorer la précision de l'estimation mais aussi de détecter précocement les anomalies ou défauts capteurs, renforçant ainsi la sûreté et la fiabilité du système hybride [189].

Dans un cadre linéarisé, un SMO appliqué à un modèle de batterie peut être représenté sous la forme suivante :

$$\Sigma_{SMO} : \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + B_f\hat{f}(t) + H \cdot \text{sign}(e_y(t)) \\ \hat{f}(t) = L_f \cdot \text{sign}(e_y(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t) + D_f\hat{f}(t) \\ e_y(t) = y(t) - \hat{y}(t) \end{cases} \tag{III.5}$$

où :
- $\hat{x}(t)$ est le vecteur d'état estimé,
- $u(t)$ représente l'entrée du système,
- $\hat{f}(t)$ désigne la perturbation ou le défaut estimé,
- $e_y(t)$ correspond à l'erreur de sortie,
- H et L_f sont des gains d'observateur qui garantissent l'attractivité et la convergence vers la surface de glissement.

L'observateur par mode glissant est défini par les équations suivantes, incluant un terme de commutation proportionnel au signe de l'erreur :

$$\begin{cases} \dot{\hat{V}}_{bat} = f(\hat{x}, I) + M_1 \cdot \text{sign}(e_{V_{bat}}) \\ \dot{SOC} = g(\hat{x}, I) + M_2 \cdot \text{sign}(e_{SOC}) \end{cases} \tag{III.6}$$

où M_1 et M_2 sont les gains de commutation, à choisir suffisamment petits pour éviter le chattering (oscillations parasites), tout en conservant une bonne vitesse de convergence.

La stabilité de l'observateur est prouvée à l'aide d'une fonction de Lyapunov quadratique telle que :

$$V(e) = \frac{1}{2}e^T Pe \tag{III.7}$$

Sa dérivée doit vérifier :

$$\dot{V}(e) \leq -\eta\|e\| \quad \Rightarrow \quad e(t) \to 0 \text{ asymptotiquement} \tag{III.8}$$

III.6.2 Définition de la surface de glissement

La stratégie de mode glissant repose sur la définition d'une surface de commutation $S(e)$ basée sur l'erreur entre la sortie réelle et estimée. Cette erreur est :

$$e_{V_{bat}} = V_{bat} - \hat{V}_{bat}, \quad e_{SOC} = SOC - \hat{SOC} \tag{III.9}$$

La surface de glissement peut être choisie comme combinaison linéaire :

$$S(t) = \lambda_1 e_{V_{bat}} + \lambda_2 e_{SOC} \tag{III.10}$$

où λ_1 et λ_2 sont des poids permettant de pondérer l'importance relative des erreurs sur V_{bat} et SOC.

III.7 Observateur par mode glissant pour la batterie

Dans le but de reconstruire les états internes non mesurables de la batterie, notamment le *l'état de Charge* (SOC), tout en tolérant les incertitudes et défauts, un observateur en mode glissant

(Sliding Mode Observer, SMO) est proposé. Ce type d'observateur est particulièrement robuste vis-à-vis des perturbations non modélisées et des incertitudes paramétriques.

Le modèle dynamique de la batterie, basé sur une structure de Thévenin d'ordre 2, peut être exprimé sous forme d'état selon la formulation suivante.

$$\begin{cases} \dot{V}_{\text{batt}} = -a_1 V_{\text{batt}} + a_1 K_1 \,\text{SOC} - a_3 V_1 - a_4 V_2 - b_1 I + a_1 K_0 \\ \dot{V}_1 = -a_3 V_1 + b_2 I \\ \dot{V}_2 = -a_4 V_2 + b_3 I \\ \dot{\text{SOC}} = a_2 V_{\text{batt}} - a_2 K_1 \,\text{SOC} + a_2 V_1 + a_2 V_2 - a_2 K_0 \end{cases} \tag{III.11}$$

Cette structure constitue une option privilégiée dans la littérature académique en raison de son équilibre entre précision et coût de calcul, comme le montre Xing dans [191] pour l'estimation en ligne du SOC d'une batterie lithium-ion.

L'observateur en mode glissant est alors formulé comme suit, en ajoutant des termes de commutation proportionnels au signe des erreurs d'estimation :

$$\begin{cases} \dot{\hat{V}}_{\text{batt}} = -a_1 \hat{V}_{\text{batt}} + a_1 K_1 \hat{\text{SOC}} - a_3 \hat{V}_1 - a_4 \hat{V}_2 - b_1 I + a_1 K_0 + M_1 \,\text{sign}(e_{V_{\text{batt}}}) \\ \dot{\hat{\text{SOC}}} = a_2 \hat{V}_{\text{batt}} - a_2 K_1 \hat{\text{SOC}} + a_2 \hat{V}_1 + a_2 \hat{V}_2 - a_2 K_0 + M_2 \,\text{sign}(e_{\text{SOC}}) \\ \dot{\hat{V}}_1 = -a_3 \hat{V}_1 + b_2 I + M_3 \,\text{sign}(e_{V_1}) \\ \dot{\hat{V}}_2 = -a_4 \hat{V}_2 + b_3 I + M_4 \,\text{sign}(e_{V_2}) \end{cases} \tag{III.12}$$

Les erreurs d'estimation associées sont définies comme :

$$\begin{cases} e_{V_{\text{batt}}} = V_{\text{batt}} - \hat{V}_{\text{batt}} \\ e_{\text{soc}} = \text{SOC} - \hat{\text{SOC}} = K(z - \hat{z}) \\ e_{V_1} = V_1 - \hat{V}_1 \\ e_{V_2} = V_2 - \hat{V}_2 \end{cases} \tag{III.13}$$

La dynamique de l'erreur de tension de la batterie peut être obtenue en combinant les équations ci-dessus :

$$\dot{e}_{V_{\text{batt}}} = a_1 e_{V_{\text{batt}}} + a_1 K_1 e_{\text{SOC}} - a_3 e_{V_1} - a_4 e_{V_2} + M_1 \,\text{sign}(e_{V_{\text{batt}}}) \tag{III.14}$$

La fonction de commutation est définie classiquement par :

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} +1 & \text{si } x > 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \tag{III.15}$$

Les coefficients M_1, M_2, M_3 et M_4 représentent les gains de commutation. Ils doivent être choisis suffisamment petits pour éviter le phénomène de *chattering*, tout en assurant la robustesse de l'observateur face aux perturbations.

III.7.1 Analyse de stabilité par Lyapunov

Pour garantir la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation, une fonction de Lyapunov candidate est proposée :

$$V(e_{V_{\text{batt}}}) = \frac{1}{2} e_{V_{\text{batt}}}^2 \tag{III.16}$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\dot{V}(e_{V_{\text{batt}}}) = e_{V_{\text{batt}}} \cdot \dot{e}_{V_{\text{batt}}} \tag{III.17}$$

En substituant la dynamique de l'erreur et en imposant $M_1 > |a_1 e_{V_{\text{batt}}} + a_1 K_1 e_{\text{SOC}} - a_3 e_{V_1} - a_4 e_{V_2}|$, la décroissance de $V(e)$ est assurée, garantissant ainsi la stabilité.

III.7.1.1 Application à la détection de défauts de batterie

Dans le cadre de la supervision des batteries, l'observateur par mode glissant (SMO) est appliqué sur un modèle électrique équivalent, permettant de suivre et de diagnostiquer l'état interne du système. Dans cette étude, nous avons retenu le modèle de Thévenin d'ordre 2, largement adopté dans la littérature pour la surveillance des batteries en raison de sa capacité à représenter avec précision la dynamique électrochimique tout en restant relativement simple à mettre en œuvre.

L'objectif de cette approche est d'estimer certaines grandeurs internes, difficilement accessibles par mesure directe, telles que le courant de court-circuit i_{cc} ou encore la tension interne V_{int}. Ces estimations sont obtenues à partir des seules mesures disponibles de la tension externe V_{batt} et du courant I_{batt}, ce qui permet d'améliorer la robustesse du diagnostic et la précision du suivi d'état.

De nombreux travaux confirment la pertinence de l'utilisation du SMO combiné à des modèles de Thévenin pour l'estimation du SOC et du SOH des batteries lithium-ion, notamment dans des conditions dynamiques complexes [192, 193, 194].

III.7.1.2 Avantages et limites

Le SMO offre plusieurs avantages dans le cadre des véhicules électriques :

- Excellente robustesse aux incertitudes paramétriques du modèle de batterie ;
- Faible besoin de capteurs supplémentaires ;
- Mise en œuvre simple dans un environnement temps réel comme RT-LAB ;
- Possibilité de diagnostiquer plusieurs types de défauts avec un seul estimateur.

Cependant, la présence du terme $\text{sign}(s(t))$ peut introduire un phénomène de *chattering*, c'est-à-dire une oscillation rapide autour de la surface de glissement. Pour y remédier, une version adoucie (*sign* remplacée par une fonction *sat*) peut être utilisée :

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} 1 & \text{si } s > \phi \\ s/\phi & \text{si } |s| \leq \phi \\ -1 & \text{si } s < -\phi \end{cases} \tag{III.18}$$

où ϕ est une bande de tolérance contrôlant l'intensité du glissement.

III.8 Les défauts des batteries

Dans la continuité des simulations précédentes, cette section présente le schéma de diagnostic de défaut appliqué à la batterie lithium-ion. L'objectif est d'illustrer de manière synthétique la méthodologie adoptée pour la détection et l'identification des anomalies internes, en particulier les courts-circuits naissants. Ce schéma met en évidence les principales étapes du processus, depuis l'acquisition des signaux mesurés jusqu'à leur traitement par l'observateur en mode glissant et l'algorithme CUSUM. Il constitue ainsi une base visuelle pour comprendre l'intégration du diagnostic au sein de l'architecture de gestion d'énergie étudiée.

III.8.1 Méthodologie de diagnostic des défauts par observateur en mode glissant

L'estimation en ligne et le diagnostic des défauts constituent un enjeu crucial pour garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes de stockage d'énergie. En particulier, les batteries lithium-ion, largement utilisées dans les véhicules électriques et les systèmes hybrides, sont fortement dépendantes de la précision des capteurs de courant et de tension pour le suivi de leur état interne. Une défaillance de ces capteurs peut engendrer une estimation erronée de l'état de charge (SOC), compromettant à la fois la sûreté et la durée de vie de la batterie.

Pour répondre à cette problématique, une approche robuste basée sur un *Sliding Mode Observer* (SMO) a été proposée dans la littérature récente [195]. Le principe consiste à reconstruire les variables d'état de la batterie (telles que la tension, les surtensions associées aux circuits RC et le SOC) en exploitant un modèle mathématique de type Thévenin d'ordre 2, enrichi par un mécanisme de correction en mode glissant.

La structure générale de l'approche peut être résumée comme suit :

- **Entrées du système** : le courant mesuré I est appliqué à la fois au modèle mathématique et à l'observateur.
- **Reconstruction par le SMO** : l'observateur génère une estimation des variables internes $\hat{x}(t)$ (tension, SOC, surtensions dynamiques).
- **Comparaison avec les mesures réelles** : la tension de sortie mesurée est confrontée à la tension estimée, produisant une erreur de sortie $e_y(t)$.
- **Génération de résidus** : cette erreur est filtrée pour former un **signal de résidu**, qui reflète l'écart entre comportement attendu et comportement mesuré.
- **Décision de défaut** : en fonctionnement sain, le résidu est proche de zéro. Lorsqu'un capteur est défaillant, le résidu dépasse un **seuil prédéfini**, permettant de déclarer l'existence du défaut.

L'un des avantages majeurs de l'approche SMO réside dans sa **robustesse** face aux incertitudes paramétriques et au bruit de mesure. Contrairement aux observateurs classiques, la dynamique en mode glissant garantit que l'erreur de sortie converge rapidement vers une surface de glissement, assurant la fiabilité de l'estimation même en présence de perturbations. De plus, la méthode permet d'isoler les défauts capteurs sans nécessiter de redondance matérielle, ce qui réduit le coût et la complexité du système de gestion de batterie (BMS).

La Figure III.28 illustre le principe de la méthodologie : les mesures issues de la batterie (courant et tension) sont comparées aux valeurs estimées par l'observateur. L'évaluation des

résidus permet de détecter les anomalies, tout en minimisant les fausses alarmes grâce à une logique de seuil.

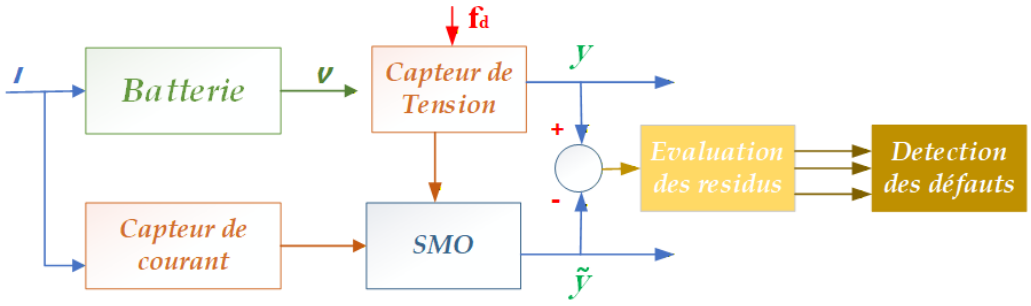


FIGURE III.28 : Architecture du diagnostic des défauts capteurs basé sur un observateur en mode glissant.

En résumé, cette approche permet :

- Une **détection précoce** des défauts capteurs (tension, courant),
- Une **estimation fiable** du SOC et des variables internes,
- Une **amélioration de la sûreté et de la durée de vie** des batteries lithium-ion.

Ces caractéristiques confirment que l'utilisation des observateurs en mode glissant constitue une solution pertinente pour le diagnostic embarqué des systèmes de stockage dans les applications de mobilité électrique et de micro-réseaux intelligents.

Modélisation des défauts capteurs

Dans les systèmes de batteries, les capteurs de tension sont généralement basés sur l'effet Hall. Les défauts les plus courants rencontrés concernent principalement :

- Le **défaut de biais** (offset), correspondant à un décalage constant ajouté à la mesure réelle,
- Le **défaut de gain**, traduisant une amplification ou une atténuation erronée du signal mesuré.

Ces deux types de défaut peuvent être représentés de manière générique comme un défaut additif appliqué à la sortie du capteur. Ainsi, la tension mesurée $y(t)$ peut s'écrire sous la forme :

$$y(t) = x(t) + f_d(t), \tag{III.19}$$

où :

- $x(t)$ désigne la valeur réelle issue du système,
- $y(t)$ correspond à la valeur mesurée par le capteur,
- $f_d(t)$ représente la composante de défaut (biais ou gain).

Ce modèle simplifié est largement adopté dans la littérature [196], car il permet d'unifier le traitement des défauts capteurs et de faciliter leur détection à travers les méthodes de diagnostic basées sur les observateurs.

La tension mesurée par le capteur peut être affectée par un défaut d'**offset** ou de **gain**. Ces défauts altèrent la mesure de la tension terminale de la batterie, ce qui peut induire une mauvaise estimation du SOC ou une mauvaise gestion d'énergie. Cette section présente la représentation d'état de la batterie dans un tel contexte.

$$x(t) = \begin{bmatrix} SOC(t) \\ V_{\text{bat}}(t) \end{bmatrix} \quad , \quad u(t) = I(t)$$

La dynamique du SOC est modélisée par :

$$\dot{SOC}(t) = -\frac{\eta}{Q_{\text{bat}}} I(t)$$

La tension terminale de la batterie V_{bat} peut être exprimée directement à partir du modèle équivalent de Thévenin d'ordre 2 :

$$V_{\text{bat}}(t) = V_{\text{OCV}}(SOC(t)) - R_0 I(t)$$

III.8.1.0.a Défaut de capteur de tension.

Lorsque le capteur de tension est affecté par un défaut, la mesure devient :

- Défaut d'offset (additif) :
$$\tilde{V}_{\text{mes}}(t) = V_{\text{bat}}(t) + V_{\text{offset}}$$
- Défaut de gain (multiplicatif) :
$$\tilde{V}_{\text{mes}}(t) = \alpha \cdot V_{\text{bat}}(t)$$

III.8.1.0.b Forme de sortie avec défaut :

On obtient ainsi une équation de sortie avec défauts :

$$y(t) = h(x(t), u(t)) + f_d(t)$$

où :

$$h(x, u) = V_{\text{OCV}}(SOC) - R_0 u(t)$$

et où le terme de défaut $f_d(t)$ traduit l'écart entre la mesure fautive et la valeur idéale :

$$f_d(t) = \begin{cases} V_{\text{offset}} & \text{(défaut d'offset)} \\ (\alpha - 1) \cdot V_{\text{bat}}(t) & \text{(défaut de gain)} \end{cases}$$

III.8.1.1 Tension mesurée avec défaut capteur

La tension mesurée $\tilde{V}_{\text{mes}}(t)$ est affectée par un défaut de capteur :

- Défaut d'**offset** :

$$\tilde{V}_{\text{mes}}(t) = V_{\text{bat}}(t) + V_{\text{offset}}$$

- Défaut de **gain** :

$$\tilde{V}_{\text{mes}}(t) = \alpha \cdot V_{\text{bat}}(t)$$

Ainsi, la sortie mesurée dans la représentation d'état devient :

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_d(t)$$

avec :

$$C = \begin{bmatrix} \dfrac{dV_{\text{OCV}}}{dSOC} & -1 & -1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} -R_0 \end{bmatrix}$$

et $f_d(t)$ modélise le défaut :

$$f_d(t) = \begin{cases} V_{\text{offset}} & \text{(offset)} \\ (\alpha - 1)(Cx(t) + Du(t)) & \text{(gain)} \end{cases}$$

III.8.2 Effet de défaut capteur de tension sur l'état de charge

Dans cette section, nous analysons l'impact de défaut de capteur de tension sur l'estimation du *l'état de charge* (SOC) de la batterie. Le défaut considéré est un défaut d'offset, modélisé comme une perturbation additive appliquée à la mesure de tension V_{bat} utilisée par l'observateur en mode glissant.

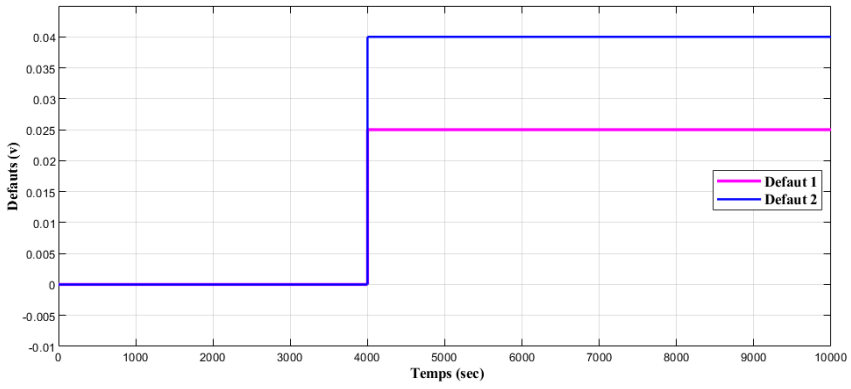


FIGURE III.29 : Défaut capteur de tension simulé

La Figure III.29 illustre la mise en œuvre du défaut. Avant $t = 4000$ s, la tension est mesurée correctement. À partir de cet instant, un offset positif constant de $+0.025$ V est ajouté à la tension mesurée, simulant un dérèglement ou une dérive lente du capteur. Cette erreur systématique a des répercussions importantes sur la précision de l'estimation du SOC, comme le montre l'analyse suivante.

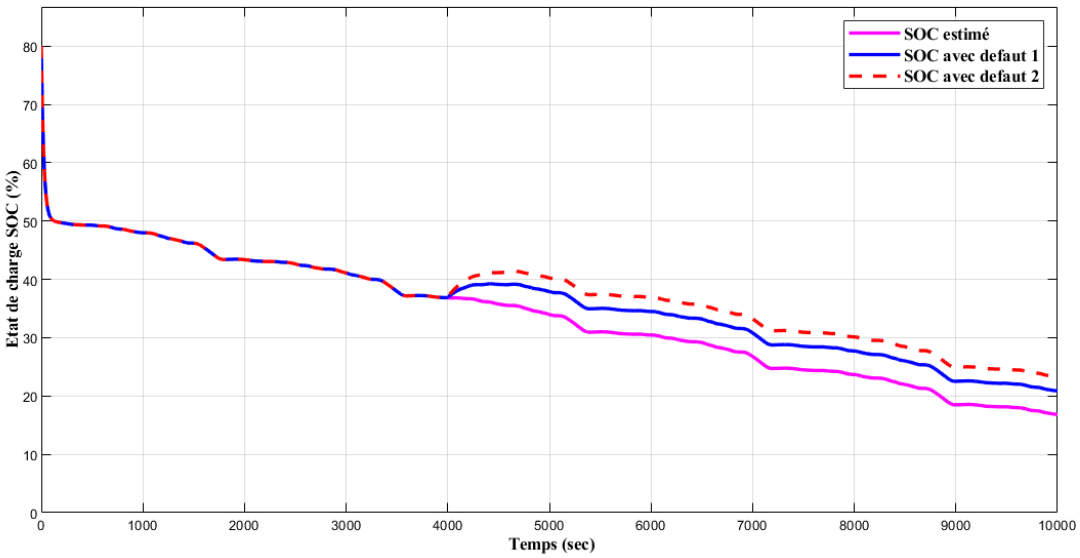


FIGURE III.30 : Estimation du SOC sous défaut de capteur de tension

Dans **la Figure III.30**, on observe que, suite à l'apparition du défaut, l'estimation du SOC dérive de plus en plus par rapport à la valeur réelle. Cette sous-estimation s'explique par la mesure faussée de la tension de la batterie, utilisée dans les équations de l'observateur. L'observateur corrige ainsi son estimation sur la base d'une mesure erronée, conduisant à une trajectoire biaisée.

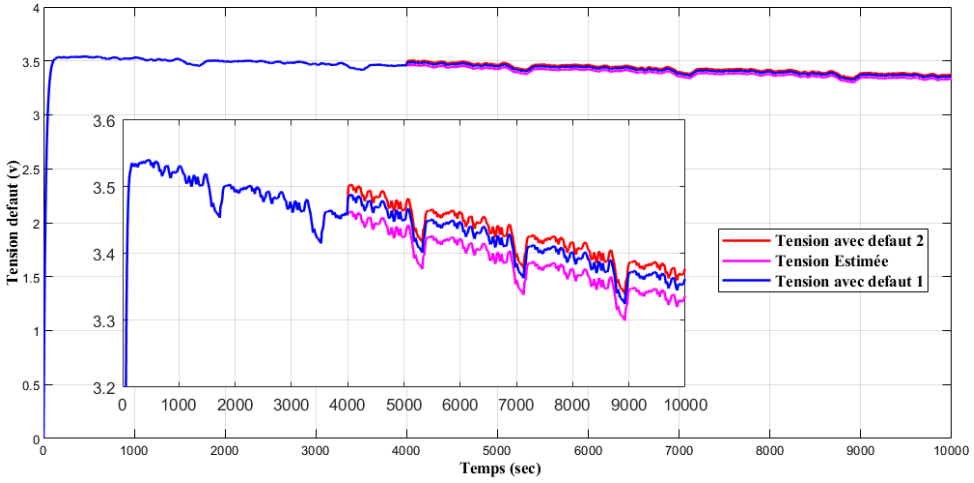


FIGURE III.31 : Impact d'une mesure de tension erronée sur l'estimation

La Figure III.31 complète l'analyse en montrant l'impact du défaut sur la tension estimée. L'écart entre les deux courbes devient significatif après $t = 4000$ s, ce qui confirme que l'estimation n'est plus fiable. Un zoom inséré dans la figure met en évidence l'écart d'environ 25 mV entre la tension réelle et celle mesurée, traduisant le défaut injecté. Ce biais de mesure induit une fausse rétroaction dans la boucle d'observation du SOC. L'ensemble de ces résultats met en évidence la sensibilité d'un observateur d'état aux défauts de capteurs. Dans le cas d'un offset ou d'un gain incorrect sur la tension mesurée, les erreurs d'estimation du SOC peuvent dépasser 10 % sur un cycle de fonctionnement prolongé, ce qui peut induire une mauvaise décision de gestion d'énergie ou entraîner une surutilisation de la batterie.

Cela justifie l'intérêt de développer des algorithmes d'observation tolérants aux défauts, ou

bien couplés à des mécanismes de détection (comme CUSUM ou logique floue), afin de limiter les effets néfastes de ces erreurs de capteur.

III.8.3 Représentation d'état de la batterie avec défaut court circuit

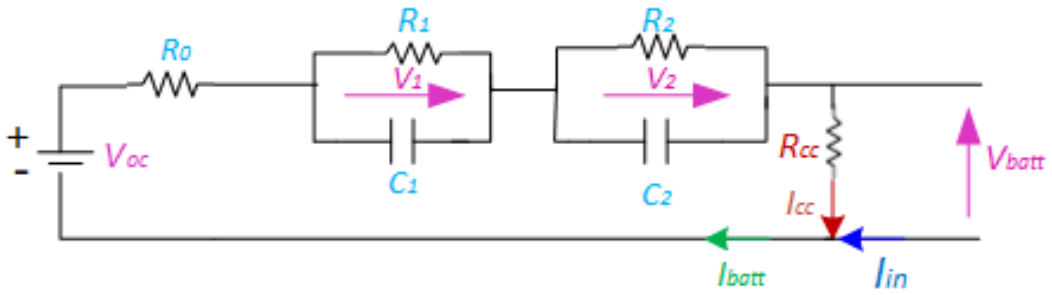


FIGURE III.32 : Batterie Thevenin 2nd ordre avec défaut court-circuit.

Le défaut de court-circuit est introduit comme une charge équivalente résistive très faible R_{cc}, provoquant un courant de court-circuit

Ce courant représente la sortie supplémentaire permettant de détecter ou simuler un défaut. Afin d'étudier le comportement de la batterie en cas de court-circuit, on introduit un courant de défaut I_{cc}, défini comme :

$$I_{\text{cc}} = \frac{V_{\text{batt}}}{R_{\text{cc}}}$$

où R_{cc} est la résistance équivalente de court-circuit, supposée très faible. Ce courant est utilisé comme **sortie supplémentaire** du modèle, en complément de la tension batterie et de l'état de charge.

Le vecteur d'état reste :

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V_{\text{batt}}(t) \\ SOC(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = I(t)$$

La nouvelle sortie est :

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} V_{\text{batt}}(t) \\ SOC(t) \\ I_{\text{cc}}(t) \end{bmatrix}$$

En se basant sur les équations de base du modèle de Thévenin d'ordre 2, le comportement dynamique de la batterie est modélisé comme suit :

$$\begin{cases} V_{\text{batt}} = V_{\text{oc}} + I_{\text{batt}} R_0 + V_1 + V_2 \\ \dot{V}_1 = -\dfrac{1}{R_1 C_1} V_1 + \dfrac{I_{\text{batt}}}{C_1} \\ \dot{V}_2 = -\dfrac{1}{R_2 C_2} V_2 + \dfrac{I_{\text{batt}}}{C_2} \\ \dot{SOC} = \dfrac{I_{\text{in}}}{C_n} \end{cases} \tag{III.20}$$

La tension à vide est linéarisée par :

$$V_{\text{oc}} = K_0 + K_1 SOC \tag{III.21}$$

Avec l'ajout du défaut de court-circuit et d'après la loi des nœuds, le courant est donné comme suit

$$I_{\text{in}} = I_{\text{batt}} + I_{\text{cc}} \tag{III.22}$$

Le courant de court-circuit est défini par :

$$I_{\text{cc}} = \frac{V_{\text{batt}}}{R_{\text{cc}}} \tag{III.23}$$

En remplaçant V_{oc} de (III.21) dans (III.20) :

$$V_{\text{batt}} = K_0 + K_1 SOC + I_{\text{batt}} R_0 + V_1 + V_2$$

En exprimant les dérivées du vecteur d'état comme suit :

$$\begin{cases} \dot{V}_{\text{batt}} = -a_1 V_{\text{batt}} - a_1 K_1 SOC + a_3 V_1 + a_4 V_2 + b_1 I_{\text{batt}} - b_1 I_{\text{cc}} + a_1 K_0 \\ \dot{SOC} = a_2 V_{\text{batt}} - a_2 K_1 SOC - a_2 V_1 - a_2 V_2 - a_2 K_0 \\ \dot{V}_1 = -a_3 V_1 + b_2 I_{\text{batt}} - b_2 I_{\text{cc}} \\ \dot{V}_2 = -a_4 V_2 + b_3 I_{\text{batt}} - b_3 I_{\text{cc}} \end{cases} \tag{III.24}$$

avec :

$$a_1 = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2}, \qquad a_2 = \frac{1}{R_t C_n},$$
$$a_3 = \frac{1}{R_2 C_2}, \qquad a_4 = \frac{1}{R_1 C_1},$$

$$b_1 = \frac{K_1}{C_n} + \frac{R_0}{R_1 C_1} + \frac{R_0}{R_2 C_2} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2},$$
$$b_2 = \frac{1}{C_1}, \qquad b_3 = \frac{1}{C_2}$$

—

La représentation du système, est représente comme suit :

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{\text{in}} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{f}$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} V_{\text{batt}} \\ SOC \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} I_{\text{batt}} \end{bmatrix}$$

avec :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_1 K_1 & a_3 & a_4 \\ a_2 & -a_2 K_1 & -a_2 & -a_2 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} b_1 & -b_1 \\ 0 & 0 \\ b_2 & -b_2 \\ b_3 & -b_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} a_1 K_0 \\ -a_2 K_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Abréviations supplémentaires

- R_{cc} : résistance équivalente de court-circuit ()
- I_{cc} : courant de court-circuit simulé (A)

Sorties du système

$$y = \begin{bmatrix} V_{\text{batt}} \\ SOC \\ I_{\text{cc}} \end{bmatrix} = Cx + Du \tag{III.25}$$

avec :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_{\text{cc}}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{III.26}$$

III.8.4 Synthèse de l'observateur SMO pour la détection de court-circuit interne

Dans ce contexte, l'observateur en mode glissant (SMO) est conçu afin d'estimer non seulement l'état interne de la batterie (SOC, V_1, V_2), mais aussi le courant de court-circuit I_{cc}. L'intérêt de cette approche réside dans la robustesse du SMO face aux incertitudes paramétriques et aux perturbations de mesure, ce qui permet une estimation fiable du défaut même lorsque sa dynamique est rapide et difficilement mesurable.

Dans le cadre du diagnostic de défauts capteurs dans les batteries lithium-ion, l'observateur en mode glissant (SMO) constitue un outil particulièrement adapté pour assurer une estimation robuste des états internes et générer des signaux résiduels sensibles aux anomalies [197]. Ce dernier exploite la comparaison entre la dynamique issue d'un modèle mathématique de la batterie et les signaux mesurés expérimentalement. Fonctionnant en parallèle du système réel, le SMO estime en temps réel des variables d'état telles que la tension de sortie et l'état de charge (SOC), dont l'écart avec les valeurs mesurées forme un résidu exploitable pour le diagnostic.

En situation normale, ce résidu demeure faible et proche de zéro, ce qui traduit une bonne cohérence entre le modèle et le comportement réel. Lorsqu'un défaut capteur survient, cette cohérence est rompue : le résidu s'écarte significativement et devient un indicateur fiable du défaut. Pour limiter les fausses alarmes dues aux perturbations exogènes ou aux incertitudes paramétriques, un seuil de décision est introduit. Tant que le résidu reste inférieur à ce seuil, le système est considéré comme sain ; dans le cas contraire, un défaut est diagnostiqué.

Ce mécanisme repose sur l'attractivité de la surface de glissement, qui contraint l'erreur d'estimation à converger rapidement vers zéro en régime sain, garantissant ainsi une sensibilité élevée aux anomalies. Plusieurs travaux expérimentaux ont validé cette approche, confirmant son

efficacité pour isoler et détecter des défauts capteurs, y compris dans des conditions dynamiques complexes [198].
En s'appuyant sur un *observateur à mode glissant* (SMO), l'estimation précise des états internes et la détection fiable des défauts capteurs renforcent la sûreté et la fiabilité des systèmes de stockage électrochimiques [198, 197]. Concrètement, on introduit d'abord le *courant de défaut* i_f comme sortie virtuelle du modèle et on le reconstruit en temps réel via le SMO ; cette estimation alimente ensuite un détecteur statistique de type CUSUM, qui statue de façon robuste sur l'apparition et la sévérité d'un court-circuit interne.

III.8.5 Détection d'un défaut de court-circuit interne par observateur et méthode CUSUM

L'identification des défauts de type court-circuit interne (I_{cc}) dans les batteries lithium-ion constitue un enjeu majeur pour la sûreté et la fiabilité des systèmes électrochimiques. Afin de répondre à cette problématique, nous proposons une approche hybride combinant l'estimation du courant de court-circuit $\hat{I}_{cc}$ à l'aide d'un observateur en mode glissant, et l'exploitation d'une méthode statistique robuste de détection : le CUSUM (*Cumulative SUM*).

La Figure III.33 illustre le schéma fonctionnel de cette approche. Les grandeurs électriques mesurées de la batterie (I_{Batt}, V_{Batt}) alimentent l'observateur, lequel estime le courant de court-circuit $\hat{I}_{cc}$. Cette estimation est ensuite transmise à l'analyseur CUSUM, chargé de détecter les anomalies en identifiant les variations caractéristiques liées à la présence d'un défaut. L'ensemble aboutit à une décision de détection fiable, permettant un diagnostic précoce et différencié en fonction de la sévérité du défaut.

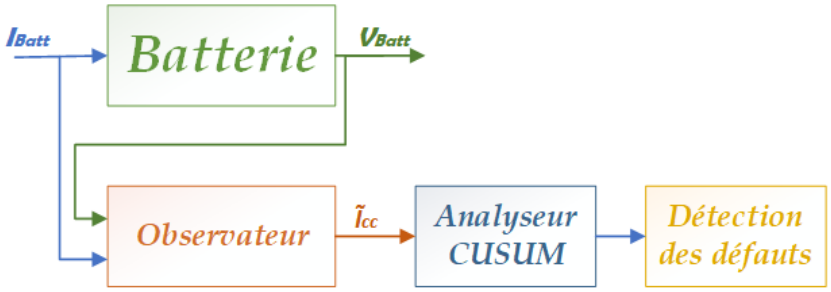


FIGURE III.33 : Organigramme de détection de court-circuit interne basé sur l'observateur et la méthode CUSUM

La méthode CUSUM est reconnue pour son efficacité dans la détection des changements abrupts au sein de séries temporelles [199]. Elle repose sur l'accumulation progressive d'une statistique de vraisemblance, permettant de mettre en évidence des écarts significatifs par rapport à un fonctionnement sain. Des travaux récents, comme ceux de Meng [129], ont confirmé la pertinence de cette approche dans le cadre du diagnostic de défauts dans les batteries lithium-ion.

Cependant, la méthode CUSUM appliquée seule présente certaines limites, notamment sa sensibilité aux bruits de mesure et aux variations progressives qui peuvent engendrer des faux positifs. C'est pourquoi, dans ce travail, nous proposons une combinaison entre un observateur en mode glissant et le détecteur CUSUM. L'observateur permet d'estimer avec robustesse le courant de court-circuit interne $\hat{I}_{cc}$, même en présence de perturbations, tandis que le CUSUM exploite cette estimation pour assurer une détection statistiquement fiable. Cette approche hybride offre ainsi un compromis entre précision d'estimation et rapidité de détection, améliorant significativement les performances par rapport à une utilisation isolée du CUSUM. Pour formaliser la

détection, on définit la statistique CUSUM cumulée :

$$S_N = \sum_{k=1}^{N} s_k \tag{III.27}$$

où, pour une variation de moyenne, s_k est donné par :

$$s_k = (\mu_f - \mu_h) \cdot \frac{\hat{I}_{cc}(k) - (\mu_f + \mu_h)/2}{\sigma_h^2} \tag{III.28}$$

avec :

- μ_f : moyenne de $\hat{I}_{cc}$ en présence de défaut,
- μ_h : moyenne de $\hat{I}_{cc}$ en condition saine,
- σ_h^2 : variance de $\hat{I}_{cc}$ en condition saine,
- $\hat{I}_{cc}(k)$: valeur estimée du courant au pas k.

La variable de décision CUSUM est définie par :

$$DS_N(k) = S_N(k) - \min_{1 \le j \le k} S_N(j) \tag{III.29}$$

Un défaut est déclaré lorsque $DS_N(k)$ dépasse un seuil Th, choisi à partir du fonctionnement sain. Typiquement [199] :

$$Th = 0.89 \cdot DS_{N,max}^{healthy} \tag{III.30}$$

Dans notre cas, les simulations (500 réalisations saines) ont permis d'estimer ce seuil à $Th = 640.44$.

III.8.5.1 Efficacité de la méthode

L'implémentation de la méthode CUSUM sur les signaux $\hat{I}_{cc}$ simulés permet une détection efficace des défauts naissants. Les **Figures III.35, III.36 et III.37** illustrent les résultats obtenus sous différentes valeurs de la résistance de court-circuit interne R_{sc}.

Cette approche permet d'assurer une surveillance robuste et rapide, même en présence de défauts faibles (valeurs faibles de R_{sc}), ce qui est essentiel pour prévenir les dégradations irréversibles ou les risques de sécurité dans les systèmes de stockage à base de batteries lithium-ion.

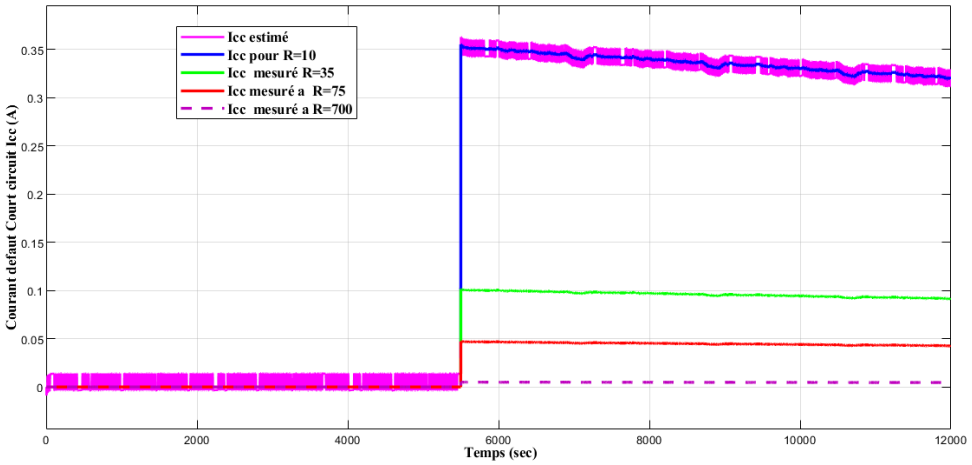


FIGURE III.34 : Courants de court-circuit : mesurés vs estimés selon R_{cc}

La **Figure III.34** illustre l'évolution des courants de court-circuit I_{cc} mesurés pour plusieurs scénarios de défaut interne dans la batterie, caractérisés par des résistances R_{cc} différentes (10 Ω, 35 Ω, 75 Ω et 700 Ω). Ces courbes sont comparées aux valeurs estimées par l'observateur.

On remarque que la sévérité du défaut est directement liée à la valeur de R_{cc} : plus la résistance est faible, plus le courant de court-circuit est élevé, traduisant un défaut critique. À l'inverse, lorsque R_{cc} est grand (700 Ω), le courant de fuite est quasi négligeable, ce qui correspond à une situation saine ou faiblement dégradée.

Pour le cas le plus sévère ($R_{cc} = 10$ Ω), l'estimation de l'observateur recoupe presque parfaitement la mesure expérimentale, démontrant une excellente précision du modèle dans des conditions extrêmes. Cette fidélité est particulièrement importante, car les défauts sévères constituent les situations les plus critiques à détecter rapidement afin d'éviter l'emballement thermique ou des défaillances irréversibles de la batterie.

Dans les scénarios intermédiaires ($R_{cc} = 35$ Ω et 75 Ω), l'écart entre les courants mesurés et estimés reste limité, ce qui confirme la robustesse de l'observateur même pour des défauts progressifs moins marqués. Enfin, pour la valeur élevée de $R_{cc} = 700$ Ω, le courant simulé tend vers zéro et l'observateur reflète correctement ce comportement, validant ainsi sa capacité à discriminer un fonctionnement normal d'une situation dégradée.

Ainsi, l'observateur est capable de suivre avec précision la dynamique du courant de court-circuit pour différents niveaux de sévérité. Cette propriété est essentielle pour le diagnostic précoce, car elle assure à la fois la détection rapide des défauts graves et la sensibilité suffisante pour identifier des dégradations plus progressives.

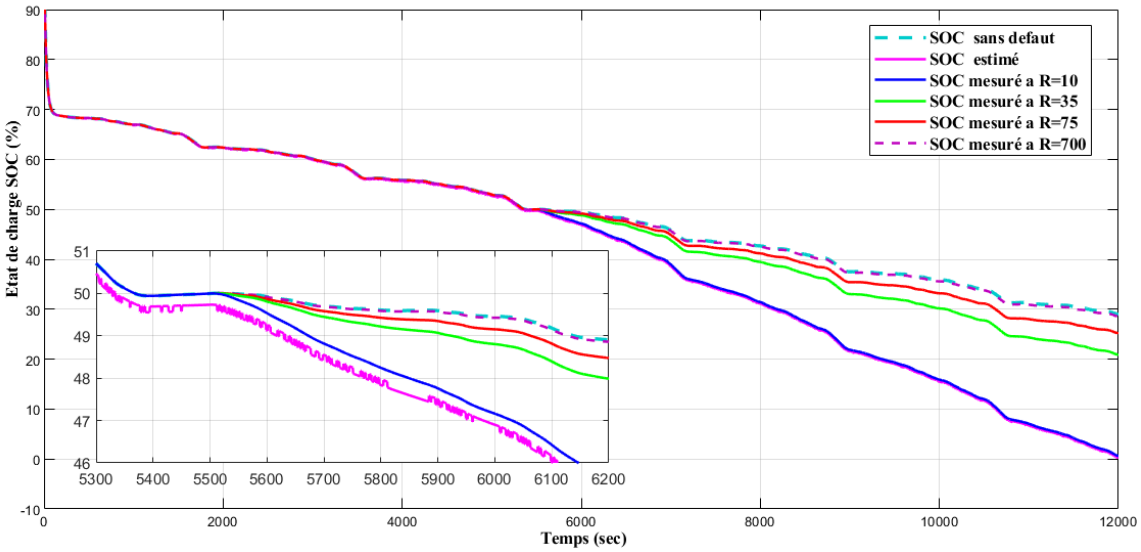


FIGURE III.35 : Évolution du SOC estimé et mesuré pour différents niveaux de court-circuit interne

L'impact du défaut de court-circuit interne sur l'état de charge (SOC) de la batterie est représenté à **la Figure III.35**. On observe que la présence d'un défaut accélère considérablement la décharge de la batterie : plus la résistance de court-circuit R_{cc} est faible, plus la chute du SOC est rapide et prononcée. Cette évolution traduit directement une dissipation accrue d'énergie sous forme de pertes internes, particulièrement visible dans les scénarios sévères ($R_{cc} = 10$ Ω).

Le SOC estimé par l'observateur suit de près la dynamique mesurée pour l'ensemble des cas simulés, validant ainsi la robustesse du modèle face à différents niveaux de sévérité du défaut. La concordance entre estimation et mesure démontre que la méthode observateur–CUSUM ne se

limite pas à détecter l'apparition du court-circuit, mais qu'elle permet également d'évaluer son impact énergétique au cours du temps.

Ainsi, cette figure illustre non seulement la sensibilité de l'approche aux variations de R_{cc}, mais aussi sa capacité à fournir un diagnostic précoce et fiable, ouvrant la voie à une meilleure gestion préventive de la batterie et à l'évitement des défaillances critiques.

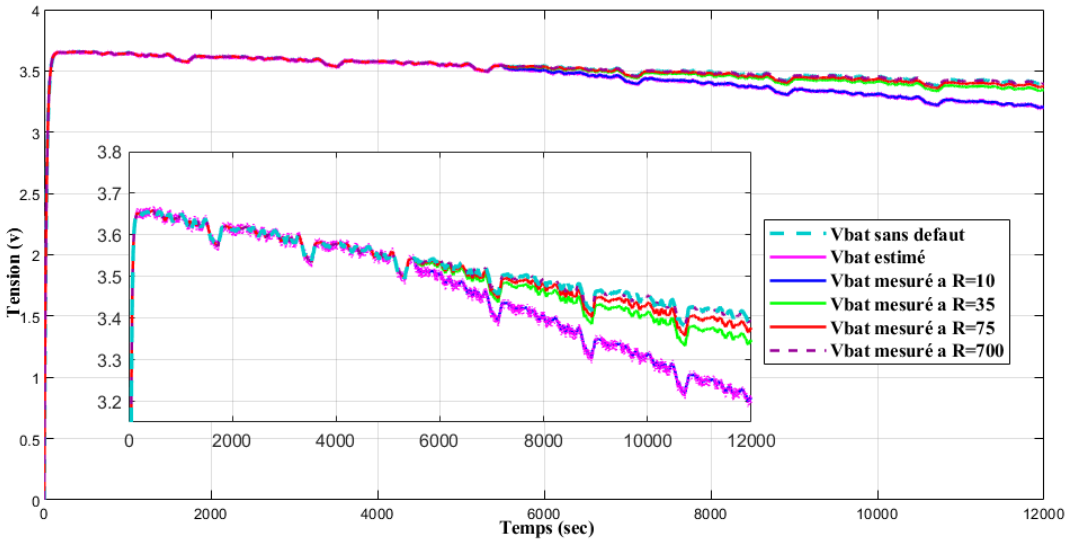


FIGURE III.36 : Tensions aux bornes de la batterie : Sans défaut, estimée et mesurée pour différentes valeurs de R_{cc}

La Figure III.36 illustre l'influence du court-circuit interne sur la tension aux bornes de la batterie, en présentant à la fois une vue d'ensemble et un zoom détaillé sur la zone critique . En fonctionnement sain, la tension se stabilise autour de sa valeur nominale et reste quasiment constante tout au long du cycle, ce qui traduit un comportement électrochimique normal sans perturbation.

En revanche, lorsqu'un court-circuit interne est introduit, une chute progressive de la tension est observée. L'ampleur de cette chute dépend fortement de la résistance R_{cc}, qui représente l'intensité du défaut. Plus R_{cc} est faible, plus la dissipation énergétique interne est importante, ce qui entraîne une diminution marquée de la tension. Ainsi, pour $R_{cc} = 10\ \Omega$, la dégradation est sévère et se traduit par une chute rapide et significative. À l'inverse, pour des valeurs plus élevées ($R_{cc} = 35\ \Omega$, $75\ \Omega$, $700\ \Omega$), la baisse est plus progressive et moins prononcée, reflétant des défauts modérés à légers.

Le zoom, met en évidence les micro-variations et les dynamiques transitoires difficilement perceptibles sur l'échelle globale. On y distingue clairement la sensibilité du système à différents scénarios de défauts, ainsi que la capacité du modèle d'observateur à suivre fidèlement la tension réelle même dans des conditions fortement dégradées. L'écart entre la tension mesurée et la tension estimée demeure faible, validant ainsi la précision de l'observateur dans la reconstitution des phénomènes internes.

En résumé, cette figure confirme deux points essentiels : (i) la sévérité du court-circuit interne peut être corrélée directement à l'évolution de la tension mesurée, et (ii) l'observateur associé à la méthode CUSUM offre un outil robuste, capable de détecter précocement les défauts tout en caractérisant leur intensité. Ce résultat est particulièrement pertinent pour la mise en place de stratégies de diagnostic embarquées, car il démontre la possibilité de distinguer entre défauts graves et dégradations progressives avant qu'elles ne compromettent la sûreté ou la longévité de la batterie.

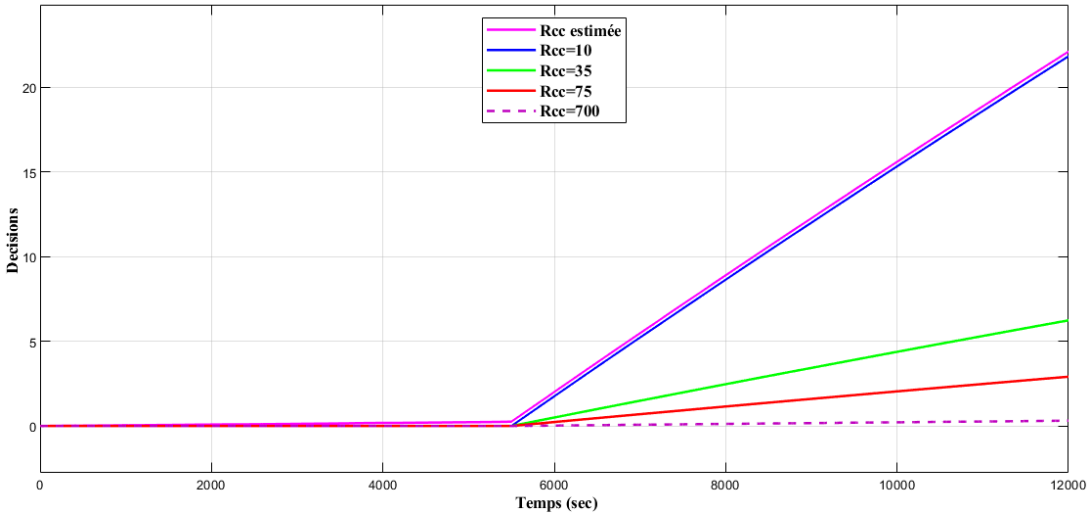


FIGURE III.37 : Évolution de la variable de décision DS_N issue de la méthode CUSUM pour différentes valeurs de R_{cc}

La Figure III.37 illustre l'évolution de la variable de décision $DS_N(k)$ issue de la méthode CUSUM pour différents niveaux de résistance de court-circuit R_{cc}. On observe que la dynamique de cette variable dépend directement de la sévérité du défaut simulé.

En effet, pour une valeur faible de R_{cc} (par exemple 10 Ω), correspondant à un court-circuit sévère, la pente de la courbe de décision est fortement marquée. Cela traduit une croissance rapide de $DS_N(k)$, permettant de franchir très tôt le seuil de détection Th, et donc une identification quasi-immédiate du défaut. À l'inverse, lorsque R_{cc} est plus élevé (75 Ω ou 700 Ω), la pente devient plus douce et la détection intervient avec un retard relatif, ce qui est cohérent avec une défaillance moins critique et une intensité de courant de court-circuit plus faible.

Cette évolution graduelle confirme que la méthode CUSUM ne se contente pas de signaler l'existence d'un défaut, mais qu'elle est également sensible à son intensité. Autrement dit, la valeur et la pente de $DS_N(k)$ fournissent une information qualitative sur la gravité du court-circuit interne.

La Figure III.37 démontre que la combinaison observateur–CUSUM assure une détection rapide et sélective des défauts internes, tout en différenciant efficacement les niveaux de sévérité. Cette propriété renforce l'intérêt de l'approche proposée pour une mise en œuvre fiable dans les systèmes de gestion de batteries lithium-ion.

III.9 Conclusion

Ce chapitre présente une stratégie de gestion d'énergie hiérarchique pour un système hybride à base de pile à combustible, batterie lithium-ion et supercapacité. Trois configurations (PAC/supercapacité, PAC/batterie, et PAC/batterie/supercapacité) ont été simulées sous MATLAB/Simulink afin d'assurer une répartition optimale des puissances selon les profils de conduite.

La seconde partie est consacrée à la supervision de la batterie. Un observateur en mode glissant est développé pour estimer le SOC en temps réel, avec détection de deux types de défauts : capteur de tension et court-circuit interne.

Les résultats valident l'efficacité des stratégies proposées en termes de performance énergétique et de robustesse face aux défauts.

Le chapitre suivant est consacré à la **validation expérimentale** des stratégies de gestion d'énergie . Les trois configurations hybrides y sont testées sur une plateforme temps réel basée

sur OPAL-RT, ce qui permet de confronter les résultats de simulation aux comportements réels et de mettre en évidence les performances et les limites des algorithmes implémentés.

Chapitre IV

Validation Expérimentale

Table de matières

IV.1 Introduction 126
IV.2 Le systeme Hard In the Loop (HIL) 126
IV.2.1 Description de la plateforme expérimentale 128
IV.2.2 Architecture matérielle et environnement logiciel 129
IV.2.3 Configuration HIL du système hybride 132
IV.2.3.1 Supervision et visualisation des signaux 132
IV.2.3.2 Intérêt de la validation HIL. 133
IV.3 Démarche expérimentale de validation sous OPAL-RT 134
IV.4 Validation expérimentale de la stratégie de gestion d'énergie et aperçu du dispositif de supervision. 136
IV.4.1 Création de l'interface Opal-Rt/Labview 136
IV.4.2 Implantation HIL du système hybride sous RT-LAB. 138
IV.4.3 Scénario 1 : Système a deux sources (PAC/Supercapacité) 139
IV.4.4 Scénario 2 : Système a deux sources (PAC/Batterie) 141
IV.4.5 Scénario 3 : Système a trois sources (PAC/SC/Batterie) 144
IV.5 Comparaison entre les architectures proposées 146
IV.5.1 Analyse des résultats 147
IV.5.1.1 Analyse selon l'état de charge du super-condensateur 147
IV.5.1.2 Analyse selon l'état de charge de la batterie 148
IV.5.1.3 Analyse selon la consommation de la pile à combustible 148
IV.5.1.4 Analyse selon la robustesse 149
IV.6 Conclusion 150

Références bibliographiques **154**

.

IV.1 Introduction

La validation expérimentale est une étape cruciale pour évaluer la performance et la fiabilité des stratégies de gestion d'énergie développées pour un système hybride associant batterie, supercapacité et pile à combustible. Après des études théoriques et des simulations sous Matlab/Simulink, il est indispensable de confronter ces résultats à des tests en conditions réelles afin d'assurer la robustesse et l'efficacité du système.

Dans ce travail, la validation expérimentale a été réalisée sur la plateforme OPAL-RT **Figure IV.1**), permettant de tester les algorithmes de gestion d'énergie en temps réel et d'analyser la répartition de la puissance entre les différentes sources. En parallèle, une observation des défauts dans la batterie a été menée en simulation permettant de détecter et d'analyser les anomalies liées à l'état de charge, aux performances et au vieillissement de la batterie.



FIGURE IV.1 : Vue d'ensemble du matériel OPAL-RT .

Ce chapitre présente la mise en œuvre expérimentale des stratégies de gestion d'énergie développées pour un système hybride multi-sources, à l'aide de la plateforme temps réel OPAL-RT. L'objectif principal est de valider la performance, la réactivité et l'équilibrage énergétique des algorithmes hiérarchiques de répartition de puissance entre la pile à combustible, la batterie et la supercapacité. Les tests sont réalisés en conditions dynamiques, en appliquant des profils de conduite standardisés, afin de reproduire les sollicitations réelles du véhicule. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'efficacité de la stratégie dans la coordination des sources, la stabilisation de la tension du bus continu, et la limitation des sollicitations de la pile à combustible.

IV.2 Le systeme Hard In the Loop (HIL)

Les plateformes *Hardware-in-the-Loop* (HIL) jouent un rôle essentiel dans le développement et la validation des systèmes complexes embarqués, notamment dans les domaines de l'électronique de puissance, de la mobilité électrique et des micro-réseaux intelligents. Le principe fondamental repose sur l'interconnexion entre un modèle numérique simulé en temps réel (représentant le comportement dynamique d'un système physique) et des composants matériels réels tels que des contrôleurs, des capteurs, ou des interfaces de puissance.

Ce couplage permet de tester en toute sécurité les algorithmes de commande, les stratégies de régulation ou de gestion d'énergie dans des conditions proches du réel, sans exposer les composants critiques à des risques physiques. L'environnement HIL facilite également l'analyse de scénarios extrêmes, la détection de défauts et l'évaluation de la robustesse des systèmes, tout

en réduisant considérablement les temps de développement et les coûts liés aux prototypes physiques [200, 201].

Dans ce contexte, la présente étude s'appuie sur une plateforme HIL pour valider expérimentalement la stratégie de gestion d'énergie proposée pour un système hybride embarqué intégrant une pile à combustible, une batterie lithium-ion et une supercapacité.

Un modèle de simulation a été spécifiquement développé et adapté pour être exécuté dans l'environnement temps réel RT-LAB de la plateforme OPAL-RT (référence OP4512) [202]. Ce modèle intègre les convertisseurs DC-DC entrelacés étudiés — à la fois unidirectionnels et bidirectionnels — ainsi que l'algorithme de gestion d'énergie basé sur des règles déterministes.

L'ensemble a été configuré conformément aux contraintes d'exécution temps réel (temps d'échantillonnage, découplage des tâches, synchronisation maître/esclave), permettant une interface directe avec les blocs matériels (sources, charges, mesures) via des entrées/sorties analogiques et numériques.

Cette configuration a pour objectif d'évaluer expérimentalement le comportement des stratégies de commande dans un environnement réaliste et embarquable. L'architecture du banc de simulation est représentée dans **la Figure IV.2**. Elle illustre la configuration expérimentale utilisée pour la validation en temps réel de la stratégie de gestion d'énergie proposée. Cette plateforme comprend :

- Un **ordinateur hôte** équipé de deux écrans permettant la supervision simultanée du code de commande (MATLAB) et du modèle Simulink de l'architecture énergétique testée ;

- Un système **Hardware-In-the-Loop (HIL)** OPAL-RT (OP4512) utilisé pour l'exécution en temps réel du modèle numérique du système multi-sources (pile à combustible, batterie, supercondensateur et convertisseurs DC/DC entrelacés) ;

- Un oscilloscope numérique Tektronix utilisé pour observer les signaux électriques, tels que les tensions et courants issus des sorties analogiques d'OPAL-RT ;

Cette configuration assure une boucle de test complète, allant de la simulation à la validation temps réel, en passant par l'analyse des formes d'ondes mesurées. L'utilisation conjointe d'OPAL-RT et de MATLAB/Simulink permet une mise en œuvre rigoureuse de la stratégie de gestion d'énergie, tout en facilitant l'injection de défauts (comme les courts-circuits internes ou les erreurs de capteurs) et l'observation de leur impact.

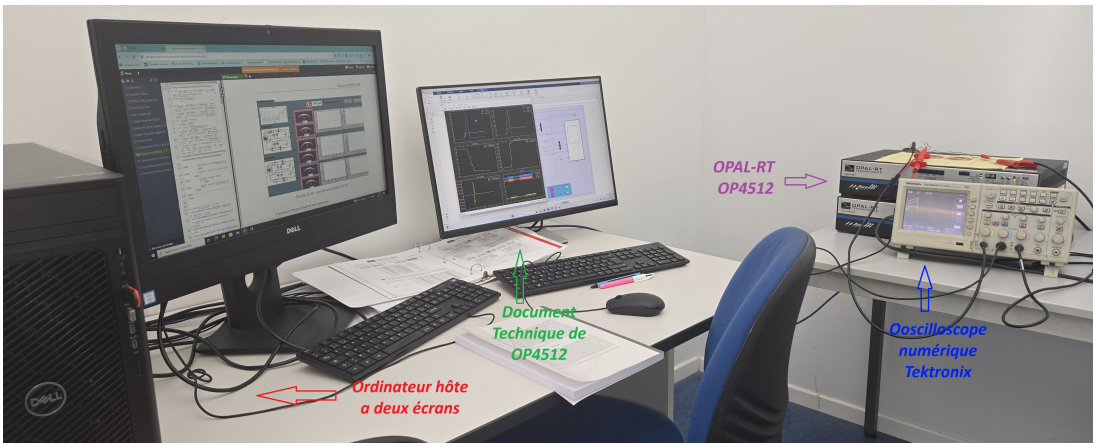


FIGURE IV.2 : Matériel utilisé pour la validation expérimentale.

IV.2.1 Description de la plateforme expérimentale

La validation expérimentale de la stratégie de gestion d'énergie développée dans ce travail repose sur l'utilisation de la plateforme OPAL-RT, reconnue pour sa capacité à exécuter des simulations Hardware-in-the-Loop (HIL) avec un haut degré de fidélité. L'objectif est de tester, en environnement sécurisé, le comportement du système hybride embarqué comprenant une pile à combustible (PAC), une batterie lithium-ion et une supercapacité, interfacées via des convertisseurs DC/DC entrelacés flottants à quatre phases.

Le banc de test matériel intègre les éléments suivants :

- **OP4512** : châssis modulaires à base de processeurs Intel Xeon, de matrices FPGA Xilinx Kintex/Artix.
- **Cartes d'E/S** : modules analogiques, numériques, PWM, CAN, RS232, Ethernet.
- **Interfaces** : borniers, adaptateurs pour convertisseurs, capteurs et bancs d'essai.

Le noyau principal de la plateforme de simulation en temps réel utilisée dans nos travaux est le logiciel **RT-LAB**, développé par OPAL-RT Technologies. RT-LAB offre une interface directe avec l'environnement **MATLAB/Simulink**, ce qui a permis de migrer de manière fluide les modèles dynamiques que nous avons développés pour la pile à combustible, la batterie lithium-ion et la supercapacité vers une exécution temps réel.

Étant donné que notre système complet est conçu pour une architecture **HIL (Hardware-in-the-Loop)**, nous avons choisi d'utiliser la suite logicielle **eMEGASIM**, parfaitement adaptée à la simulation de systèmes électroénergétiques hybrides complexes comme le nôtre. Ce choix est motivé par la compatibilité native d'eMEGASIM avec les modèles développés sous Simulink, mais aussi par sa capacité à gérer des topologies multiphases et des stratégies de gestion d'énergie embarquées.

L'écosystème OPAL-RT est modulaire et s'enrichit de plusieurs packages spécialisés permettant une extension fonctionnelle selon les besoins :

- **RT-LAB** : C'est le cœur logiciel de la plateforme. Il permet de convertir les modèles Simulink en code exécutable temps réel, de partitionner le système en sous-systèmes maître/esclave, et de superviser le déploiement sur le matériel OPAL-RT. RT-LAB gère l'interface avec les E/S analogiques et numériques, la synchronisation entre les blocs de simulation, et l'archivage des signaux critiques.
- **eMEGASIM** : Utilisé dans nos travaux, ce package est optimisé pour la simulation de systèmes de conversion d'énergie et de réseaux multiphasiques. Il permet d'exécuter en temps réel nos modèles de convertisseurs DC/DC entrelacés à quatre phases et d'analyser le comportement dynamique des sources d'énergie hybrides couplées à un bus continu.
- **eFPGASIM** : Bien qu'il ne soit pas utilisé directement ici, il est conçu pour les simulations d'électronique de puissance nécessitant de très faibles pas de temps (inférieurs à 200 ns), en exploitant pleinement les ressources des FPGAs. Il peut être envisagé dans des futures extensions pour valider la commutation haute fréquence ou l'intégration des drivers de puissance.
- **ePHASORSIM** : Spécialisé dans la simulation dynamique lente de systèmes de grande taille, tels que les réseaux électriques nationaux. Moins pertinent pour notre architecture embarquée, il permet cependant une étude complémentaire du comportement en régime permanent.

- **HYPERSIM** : Ciblant les applications HVDC et les études de protection à grande échelle, ce package est réservé aux systèmes à très haute tension. Il est plus adapté aux études de stabilité réseau qu'à notre configuration embarquée.

Grâce à cette structure modulaire, la plateforme OPAL-RT s'adapte parfaitement aux exigences de validation de notre stratégie de gestion d'énergie hybride. Elle permet de tester, dans un environnement sûr et flexible, les interactions dynamiques entre la pile à combustible, la batterie et la supercapacité, en intégrant les contraintes temps réel et les profils de conduite normalisés (NEDC, WLTP).

IV.2.2 Architecture matérielle et environnement logiciel

La plateforme retenue, à la fois modulaire et hautement intégrée, se distingue par sa capacité à combiner puissance de calcul, rapidité de communication et compatibilité avec les outils de modélisation les plus répandus. Cette section explore successivement les deux dimensions clés de cette infrastructure : l'architecture matérielle, qui définit les fondations physiques du simulateur, et le socle logiciel, qui assure le lien entre les modèles théoriques et leur exécution concrète dans un contexte temps réel.

1. Architecture matérielle

Le système OP4512 repose sur une architecture hybride articulée autour d'un processeur multi-cœur et d'un circuit logique programmable de type **FPGA Xilinx Kintex-7**. Cette combinaison permet de répartir intelligemment les tâches computationnelles : le calcul déterministe à faible latence est assuré par le FPGA, tandis que les fonctions de gestion du système, d'interface et de communication sont prises en charge par le processeur central. Le FPGA, indexé 410 dans l'architecture interne (voir **Figure IV.3**), est connecté via un lien PCIe au CPU intégré, garantissant un débit élevé pour le transfert de données entre les deux entités.

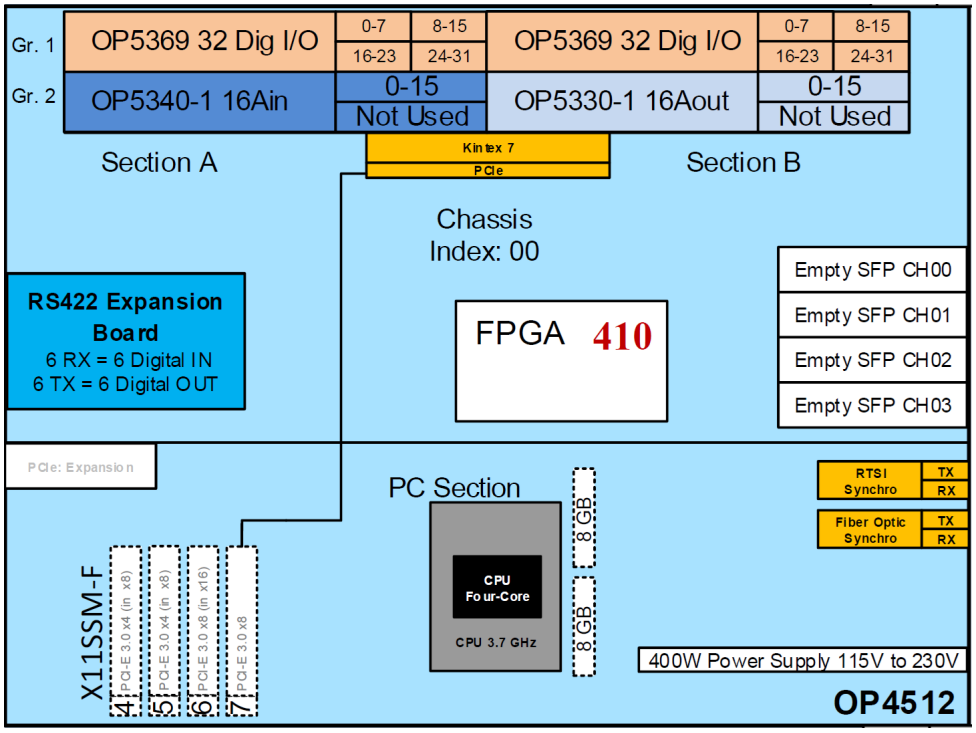


FIGURE IV.3 : Vue détaillée de la plateforme OP4512.

L'organisation matérielle repose sur deux sections principales. La section A regroupe les cartes OP5340-1 pour l'acquisition analogique (16 voies), les modules OP5369 pour les entrées/sorties numériques (jusqu'à 64 canaux), ainsi que le module d'extension RS422 permettant de générer et recevoir des signaux numériques différentiel (6 entrées RX et 6 sorties TX). La section B comprend les modules de sortie analogique OP5330-1, les connecteurs optiques SFP (jusqu'à quatre canaux), ainsi que les interfaces de synchronisation via RTSI et fibre optique.

Le châssis est également doté de slots PCIe permettant l'extension du système ou le raccordement à un PC hôte externe. Ces caractéristiques sont résumées fonctionnellement dans le schéma d'architecture de **la Figure IV.4**, qui met en évidence la cohabitation des modules I/O, du cœur FPGA, et du processeur hôte opérant sous Linux temps réel.

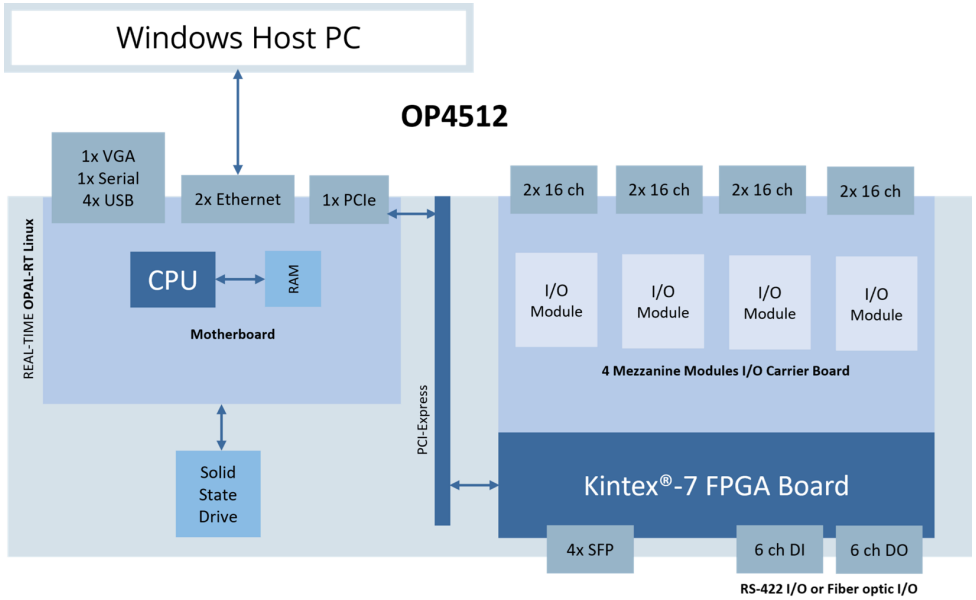


FIGURE IV.4 : Schéma global du système OP4512.

La description fonctionnelle du système OP4512 peut être complétée par une présentation synthétique de ses caractéristiques matérielles et logicielles. Le tableau IV.1 ci-dessous regroupe les éléments essentiels définissant les performances de la plateforme, notamment le type de processeur embarqué, la nature du FPGA utilisé, les compatibilités logicielles, ainsi que les interfaces d'entrée/sortie disponibles. Ces spécifications confirment la capacité du simulateur à répondre aux exigences rigoureuses des applications temps réel critiques dans les domaines de l'électronique de puissance, des micro-réseaux, et de la supervision de systèmes hybrides.

TABLEAU IV.1 : Résumé des spécifications matérielles et logicielles du simulateur OP4512

Composant	**Caractéristiques techniques**
Ordinateur intégré	Intel® Xeon® E3 quad-core, 3.7 GHz, 16 Go RAM, 250 Go SSD
FPGA	Xilinx® Kintex®-7 modèle 410T
Compatibilité logicielle	Environnements RT-LAB et HYPERSIM
Outils et bibliothèques compatibles	ARTEMiS, eHS, ePHASORSIM, Orchestra, RT-XSG

Composant	Caractéristiques techniques
Cartes d'E/S (jusqu'à 4 modules par châssis)	• 16 canaux analogiques par module (jusqu'à 64 canaux) • 32 canaux numériques par module (jusqu'à 128 canaux)
Communication haut débit	4 ports SFP optiques, débit de 1 à 5 Gbit/s
Connectivité Micro ATX	• 1 port VGA • 4 ports USB • 1 port HDMI • 2 ports Ethernet • 1 slot PCIe libre (pour carte d'E/S optionnelle)
Dimensions et poids	• Format 2U rackable (19") • Dimensions : 43,2 cm (L) × 28 cm (P) × 8,9 cm (H) • Poids approximatif : 5 kg

2. Environnement logiciel

Pour permettre une interactivité avec les outils de modélisation, la plateforme OP4512 est étroitement intégrée à l'environnement **RT-LAB** développé par OPAL-RT. RT-LAB fonctionne comme une surcouche de MATLAB/Simulink, permettant une transition fluide entre la simulation hors ligne et l'exécution temps réel. Une fois le modèle finalisé dans Simulink, celui-ci est automatiquement compilé pour être distribué entre les unités de calcul (processeur hôte et FPGA), sans nécessiter de reprogrammation manuelle. L'interconnexion est assurée par une interface TCP/IP entre le poste de travail et le simulateur (**Figure IV.5**), permettant un pilotage dynamique, une visualisation des signaux, et une supervision complète de la simulation en cours.

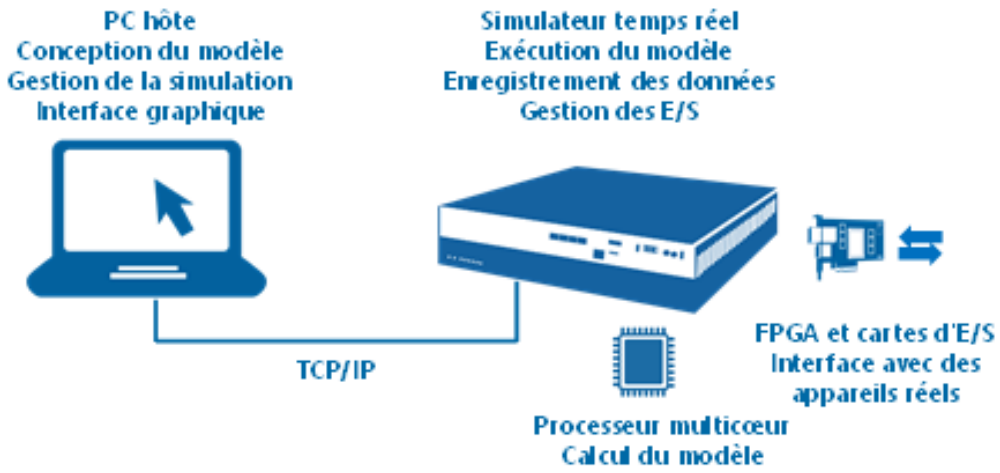


FIGURE IV.5 : Configuration générale d'une plateforme HIL basée sur OPAL-RT avec gestion distante via une station hôte.

Le modèle est structuré de manière hiérarchique selon une logique maître/esclave. Le **sous-système maître**, représenté par le bloc `SC_gui`, assure la gestion de l'interface utilisateur, la supervision en ligne, l'enregistrement des données, et la communication avec l'environnement de contrôle. Ce bloc permet à l'utilisateur d'interagir avec la simulation en temps réel via des

interfaces graphiques (dashboards, boutons, indicateurs, etc.).

En parallèle, le **sous-système esclave**, noté `SM_computation`, est dédié à l'exécution des équations différentielles décrivant le comportement des composants énergétiques (pile à combustible, batterie, supercondensateur), des convertisseurs DC/DC, ainsi que des algorithmes de gestion d'énergie et de détection de défauts. Cette séparation logique entre les fonctions de calcul et d'interface assure un fonctionnement robuste, tout en facilitant le déploiement d'architectures complexes. **La Figure IV.6** illustre cette structuration modulaire du modèle.

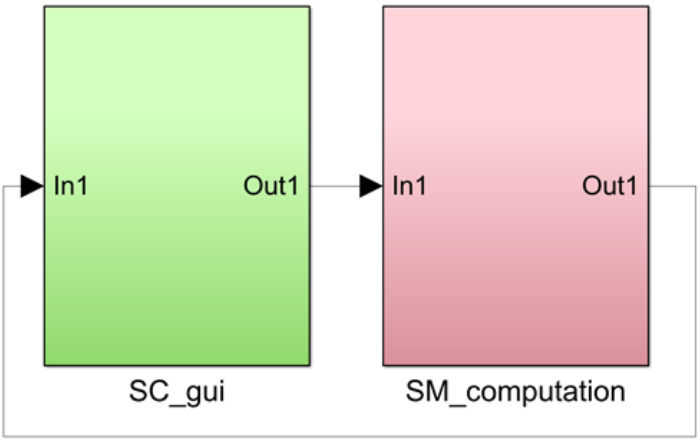


FIGURE IV.6 : Organisation modulaire du modèle : interface graphique (SC_gui) et calcul temps réel (SM_computation) dans Simulink.

Grâce à cette architecture, la plateforme OP4512 constitue un outil expérimental de haute précision, permettant de tester des stratégies avancées de commande et de supervision dans des conditions représentatives du monde réel, tout en assurant un haut niveau de sûreté et de reproductibilité.

IV.2.3 Configuration HIL du système hybride

L'ensemble du système énergétique est modélisé numériquement, y compris :

- La PAC basse tension avec ses limitations dynamiques lentes,
- La batterie modélisée par un schéma équivalent de Thévenin d'ordre deux,
- La supercapacité, décrite par un modèle RC linéaire rapide,
- Trois convertisseurs DC/DC : unidirectionnel pour la PAC, bidirectionnels pour la batterie et la supercapacité.

Le simulateur OPAL-RT agit comme un jumeau numérique temps réel du système hybride, avec des entrées/sorties analogiques et numériques pouvant être connectées à des équipements physiques (charge électronique, simulateur de batterie EA-PSB, ou interfaces CAN si nécessaire).

IV.2.3.1 Supervision et visualisation des signaux

Durant les simulations, l'outil `ScopeView` permet une observation en temps réel des grandeurs critiques (tension bus DC, courant injecté, SOC batterie, etc.). Par ailleurs, une interface graphique

personnalisée dans RT-LAB facilite la sélection du mode de fonctionnement (PAC/SC, PAC/-batterie, ou les trois sources) et le suivi des profils de conduite (cycles NEDC/WLTP injectés numériquement).

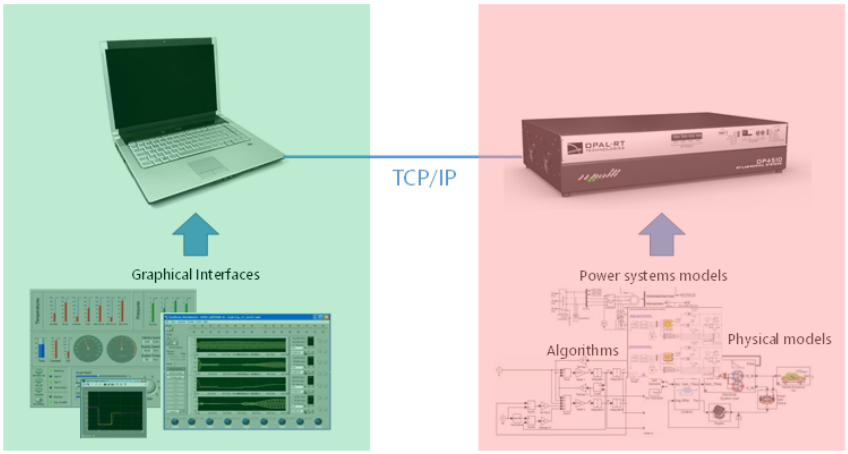


FIGURE IV.7 : Schéma de l'interconnexion PC hôte / OPAL-RT via le protocole TCP/IP.

IV.2.3.2 Intérêt de la validation HIL

La validation en environnement *Hardware-in-the-Loop* (HIL) constitue une étape intermédiaire essentielle entre la simulation purement logicielle et les tests sur système physique réel. Elle permet d'évaluer le comportement global du système dans un cadre temps réel sécurisé, sans risquer d'endommager des composants matériels sensibles ou coûteux.

Dans ce travail, la simulation HIL a été exploitée pour analyser plusieurs aspects critiques du système hybride PAC / batterie / supercapacité :

- La **robustesse** et la **réactivité** de la stratégie de gestion d'énergie, basée sur des règles déterministes tenant compte de l'état de charge (SOC), de la dynamique de la demande en puissance, et des capacités de réponse de chaque source ;
- L'**efficacité de la répartition de puissance** entre les sources, en fonction des conditions de fonctionnement : phases transitoires, récupération d'énergie, ou maintien de la charge moyenne par la pile à combustible ;
- La **stabilité des boucles de commande** courant/tension, régulées par des contrôleurs de type PI conçus à partir de modèles linéarisés des convertisseurs DC/DC ;
- La **cohérence dynamique** entre les résultats issus de la simulation hors ligne (sous MATLAB/SIMULINK) et ceux obtenus lors de l'exécution temps réel sur la plateforme HIL.

Ce processus de validation préliminaire sans recours immédiat au matériel physique permet d'anticiper divers phénomènes pouvant compromettre la robustesse du système embarqué, tels que :

- Les retards de calcul ou de communication,
- Les saturations de composants dans les chaînes de puissance ou de mesure,
- Les conflits de priorité entre les sources d'énergie dans les scénarios multi-transitoires.

L'implémentation sur la plateforme **OPAL-RT (OP4512)**, couplée à l'environnement **RT-LAB**, a permis une validation fonctionnelle complète dans un cadre temps réel rigoureux. Cette configuration a offert une flexibilité importante pour tester de manière modulaire différentes topologies hybrides :

- Architecture à deux sources : PAC / supercapacité, PAC / batterie,
- Architecture complète à trois sources : PAC / batterie / supercapacité.

Dans chaque configuration, la supervision, les lois de commande a été conservés, ce qui a permis de comparer directement les performances globales du système et d'évaluer la scalabilité de la stratégie proposée.

Avantages de la simulation temps réel La simulation temps réel permet de :

- Réduire les risques liés aux tests sur systèmes physiques.
- Optimiser les performances des systèmes de commande.
- Accélérer le développement de prototypes via des itérations rapides.
- Intégrer progressivement des composants réels dans la boucle (HIL) pour des tests représentatifs [174].

Conception basée sur les modèles RT-LAB permet une conception *model-based design* efficace :

- Création de modèles dynamiques multi-domaines dans Simulink.
- Génération automatique de code C/C++ pour le calcul en temps réel.
- Déploiement rapide sur des cibles matérielles OPAL-RT.

IV.3 Démarche expérimentale de validation sous OPAL-RT

La création d'un modèle temps réel compatible avec la plateforme OPAL-RT repose sur une démarche méthodique, structurée autour de la modélisation initiale sous MATLAB/Simulink, de la partition du modèle en sous-systèmes, de la compilation dans RT-LAB, puis de son déploiement sur les cibles matérielles pour exécution temps réel. L'environnement logiciel RT-LAB offre une intégration complète avec Simulink, tout en ajoutant les fonctionnalités nécessaires pour le calcul temps réel distribué sur plusieurs cœurs processeurs.

Dans notre travail, la première étape consiste à concevoir un modèle détaillé du système énergétique hybride dans Simulink. Celui-ci intègre trois sources principales : une pile à combustible, une batterie lithium-ion, et une supercapacité. Chacune de ces sources est connectée à un bus continu commun via un convertisseur DC/DC entrelacé flottant à quatre phases, modélisé de manière explicite en composants élémentaires (interrupteurs, inductances, capacités). Le contrôle des convertisseurs est assuré par des boucles de régulation en courant et tension, basées sur des régulateurs PI . L'ensemble du système est piloté par une stratégie de gestion d'énergie à base de règles déterministes, conçue pour prioriser l'usage de la pile à combustible en tant que source principale, soutenir l'effort transitoire avec la batterie, et lisser les pics de demande à l'aide de la supercapacité.

Une fois le modèle Simulink complété, la phase de partitionnement est engagée. Pour cela, le modèle est divisé en deux sous-systèmes principaux, conformément aux recommandations du manuel RT-LAB.

Le premier sous-système, contient les équations dynamiques de chacune des trois sources d'énergie utilisées :

- La pile à combustible basse tension modélisée selon une approche semi-empirique intégrant les pertes électrochimiques,
- La batterie lithium-ion représentée par un modèle de Thévenin d'ordre deux adapté à l'estimation de l'état de charge,
- La supercapacité, modélisée par un circuit RC linéaire à capacité variable.

Il intègre également les lois de commande hiérarchiques basées sur des régulateurs PI, assurant à la fois la régulation du courant (par phase) et la régulation globale de la tension du bus DC. Ces lois implémentent une stratégie déterministe de gestion d'énergie, qui répartit dynamiquement la puissance entre les sources selon leur état de charge, leur disponibilité instantanée et la demande issue du profil de conduite simulé (NEDC).

De plus, le sous-système comprend les blocs de génération de signaux de commande (PWM) et les interfaces physiques `OpInput` et `OpOutput` permettant la communication avec les cartes d'E/S du simulateur OP4512. Toutes ces fonctions sont destinées à être exécutées sur les cœurs de calcul haute performance du simulateur OPAL-RT, assurant le respect strict des contraintes de synchronisation et de pas de temps temps-réel.

Cette architecture centralisée autour du `sm_master` permet une mise à l'échelle modulaire du système, facilitant l'intégration de nouveaux scénarios, l'activation sélective des sources, ou l'ajout de couches d'observation pour une future extension vers la supervision à base d'observateurs.
Le second sous-système, nommé `sc_console`, se compose exclusivement d'éléments de visualisation et d'interaction graphique, tels que :

- Des visualiseurs de signaux internes (tension des sources, courants injectés, état de charge SOC),
- Des blocs d'interface avec ScopeView, facilitant la capture temps réel des réponses dynamiques du système simulé.

L'un des atouts majeurs du `sc_console` est sa capacité à rester accessible durant toute l'exécution temps réel. Il permet ainsi à l'opérateur ou au chercheur de superviser l'évolution du système sous sollicitation (ex. : cycle NEDC, pic de demande de puissance), de modifier à la volée les paramètres d'entrée, ou d'injecter des scénarios de test spécifiques sans interrompre la simulation.

Ce sous-système est donc fondamental pour l'expérimentation HIL, car il constitue le point d'entrée unique de communication dynamique avec le modèle exécuté sur les cœurs de calcul du simulateur OPAL-RT. Il permet également une observation fine de l'impact des décisions de gestion d'énergie en contexte multi-sources (PAC–batterie–supercapacité) et favorise l'analyse comparative entre les différentes configurations de commande testées.

Chaque sous-système doit être nommé avec un préfixe spécifique reconnu par RT-LAB (`sm_` ou `sc_`), sans quoi le compilateur ne pourra pas distinguer correctement les tâches à répartir sur le simulateur. Ce mécanisme de partitionnement permet une exécution parallèle optimisée sur le matériel OPAL-RT, garantissant un usage efficace des ressources CPU/FPGA disponibles.

Après cette structuration, le modèle est compilé à l'aide du compilateur intégré de RT-LAB, qui génère un code C/C++ exécutable pour les cibles OPAL-RT. Cette étape inclut la conversion du modèle Simulink en code S-function, puis en binaire temps réel. L'utilisateur peut ensuite charger ce binaire dans le simulateur OP4512, selon la configuration matérielle utilisée.

Le déploiement du modèle sur plusieurs cœurs de calcul permet d'atteindre des fréquences d'échantillonnage élevées, typiquement de l'ordre de 20 kHz à 100 kHz, nécessaires pour simuler fidèlement les convertisseurs entrelacés et les interactions rapides entre les trois sources d'énergie. Pendant l'exécution, l'utilisateur interagit avec le sous-système console pour visualiser les signaux internes (tension, courant, SOC) via ScopeView et un oscilloscope. Il est également possible d'ajuster des paramètres comme les seuils de SOC de la batterie ou de la supercapacité, les paramètres des régulateurs PI ou les consignes de puissance, pour observer le comportement du système en condition extrême.

Ce processus global de la conception Simulink jusqu'à l'exécution temps réel distribuée assure une validation rigoureuse, reproductible et sécurisée des stratégies de gestion d'énergie embarquées, tout en évitant les risques liés à la manipulation de dispositifs physiques.

IV.4 Validation expérimentale de la stratégie de gestion d'énergie et aperçu du dispositif de supervision

Dans le cadre de ce travail, une validation expérimentale est menée afin d'évaluer les performances de la stratégie de gestion d'énergie déterministe développée pour un système hybride multi-sources. Cette stratégie repose sur des règles hiérarchiques simples et exploitables en temps réel, visant à répartir intelligemment la puissance entre les sources d'énergie en fonction des conditions de conduite.

Trois scénarios distincts ont été retenus pour cette validation :

- **Scénario 1** : gestion d'énergie entre la pile à combustible (PAC) et la supercapacité (SC), mettant en avant la réactivité de la SC lors des phases transitoires.
- **Scénario 2** : gestion d'énergie entre la pile à combustible (PAC) et la batterie (BAT), focalisée sur le soutien de la BAT lors des demandes prolongées de puissance.
- **Scénario 3** : gestion d'énergie globale avec les trois sources (PAC, BAT, SC), illustrant la complémentarité des ressources dans un environnement dynamique complexe.

Chaque scénario est implémenté sur la plateforme temps réel OPAL-RT, avec une configuration Hardware-in-the-Loop (HIL), afin d'assurer une évaluation fidèle et représentative des comportements dynamiques du système.

Pour **piloter et observer** efficacement les essais HIL, une interface graphique utilisateur (IHM) a été développée sous **LabVIEW** et connectée au modèle temps réel **OPAL-RT (RT-LAB)**. Cette IHM constitue l'outil de supervision central : elle permet le *réglage en ligne* des paramètres des boucles locales (notamment les gains des régulateurs de courant et de tension), la *visualisation en temps réel* des grandeurs électriques (tensions, courants, puissances, SOC), ainsi que la *journalisation* des signaux et indicateurs de performance pour l'analyse et la comparaison entre scénarios. Elle est utilisée afin d'accélérer la mise au point des régulateurs en permettant le réglage en temps réel des paramètres de commande K_p, K_i et K_d, et ainsi d'analyser directement leur influence sur la stabilité, la rapidité et la précision du système. Cette flexibilité rend possible l'optimisation expérimentale des boucles de régulation sans recompilation du modèle, tout en assurant une traçabilité et une objectivation rigoureuse des résultats obtenus.

IV.4.1 Création de l'interface Opal-Rt/Labview

L'interface LabVIEW a été connectée au simulateur OPAL-RT via le protocole `OpComm` et utilise les blocs `OpInput` et `OpOutput` pour l'échange de données avec le modèle exécuté dans le

sous-système maître (`sm_solver`). L'interface graphique conçue sous LabVIEW revêt une importance cruciale dans le processus de validation en temps réel de la stratégie de gestion d'énergie PAC–Supercapacité. Elle permet non seulement de superviser le comportement dynamique du système, mais aussi d'interagir directement avec les régulateurs embarqués.

L'un des atouts majeurs de cette interface est la possibilité de modifier **en ligne** les paramètres des régulateurs PI utilisés pour la commande des convertisseurs DC/DC. Cette fonctionnalité autorise l'ajustement fin des gains proportionnels et intégrateurs sans interrompre l'exécution du modèle sur la plateforme HIL, ce qui optimise le processus de calibration en phase de test.

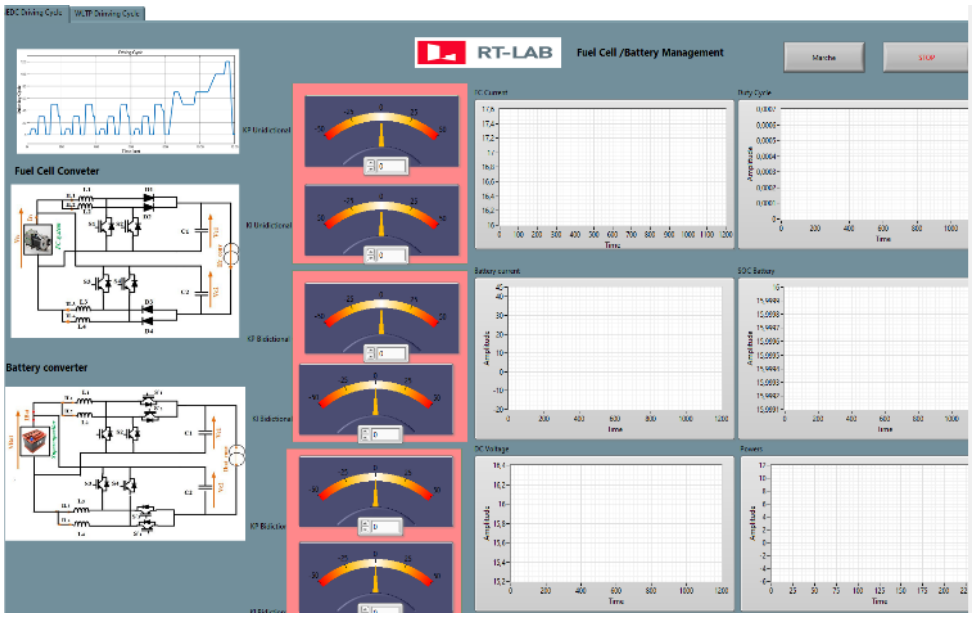


FIGURE IV.8 : Opal labview interface FC/SC.

Par ailleurs, l'interface offre une **visualisation en temps réel** des grandeurs électriques clés du système :

- Les **puissances instantanées** échangées entre la pile à combustible, la supercapacité et la charge ;
- Les **courants** injectés par chaque source dans le bus DC ;
- Le **Duty cycle** appliqué à chaque phase des convertisseurs ;
- L'**état de charge (SOC)** de la supercapacité, indicateur critique de la stratégie de gestion énergétique.

L'interface contient plusieurs sous-panneaux :

- Un **tableau de bord temps réel**, affichant les courbes de tension et de courant mesurées aux bornes de la pile à combustible (PAC) et de la supercapacité (SC), facilitant l'analyse dynamique du comportement énergétique du système.
- Un **panneau de configuration interactif**, équipé de **curseurs pour ajuster les gains** K_P **et** K_I des régulateurs PI. Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur d'affiner la réponse dynamique du système en temps réel, sans arrêter la simulation.

- Un **indicateur de statut du système**, composé de voyants virtuels affichant l'état de la connexion au simulateur, l'activation de la PAC, ainsi que la disponibilité opérationnelle de la supercapacité.

IV.4.2 Implantation HIL du système hybride sous RT-LAB

L'architecture matérielle repose sur une séparation fonctionnelle entre deux sous-systèmes : le **Sous-Système de Commande (SM)** et le **Sous-Système de Calcul (SC)**, interconnectés via le bus `OpComm`.



FIGURE IV.9 : Architecture globale HIL du modèle dans RT-LAB

La figure IV.9 présente la configuration complète de la simulation temps réel. Le bloc `SC_FC_BAT` correspond au modèle de puissance du système, tandis que le bloc `SM_FC_BAT` contient les lois de commande. Les signaux échangés incluent la tension du bus DC, les courants de chaque source, les consignes de puissance, ainsi que les gains des régulateurs PI. Le `powergui` est configuré en mode discret, avec un pas de simulation de 10^{-5} s, adapté aux exigences temps réel.

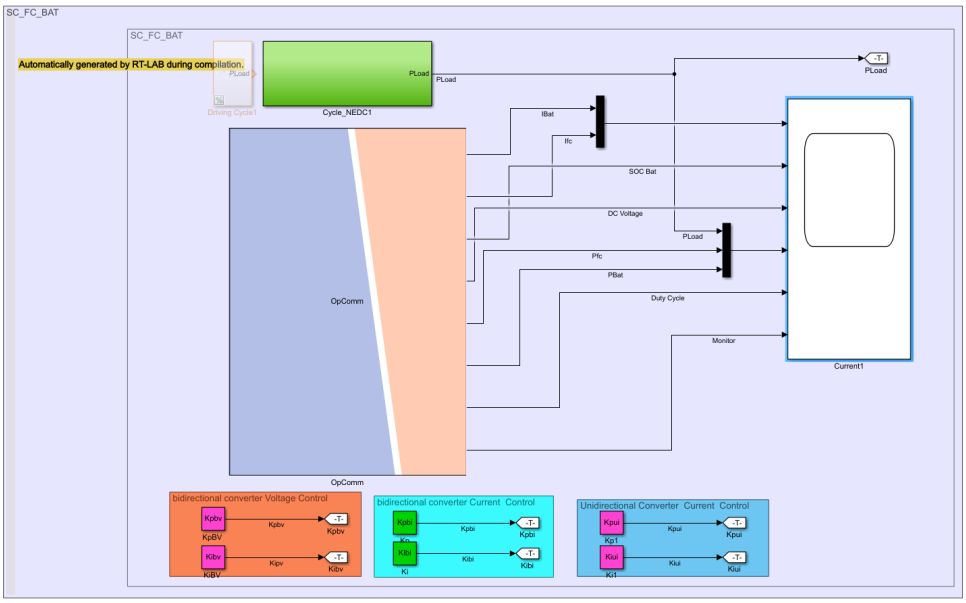


FIGURE IV.10 : Implémentation du modèle physique SC dans RT-LAB : sources et convertisseurs

La figure IV.10 détaille le modèle de puissance (SC); le bloc `SC_FC_BAT` implémente les équations dynamiques des composants physiques : la pile à combustible, la batterie, et leurs convertisseurs DC/DC associés. Un profil de puissance dérivé du cycle de conduite NEDC est injecté via le bloc `PLoad`. Les régulateurs embarqués pour les convertisseurs bidirectionnels et unidirectionnels sont implémentés localement pour assurer la stabilité de la tension et la régulation des courants.

La figure IV.11 présente le bloc de commande (SM), ce bloc `SM_model_FC_BAT` correspond à la stratégie de gestion d'énergie implémentée dans un sous-système séparé. Ce découplage respecte la méthodologie HIL où le contrôleur numérique est exécuté de manière indépendante. Le cœur du système est le bloc `Energy_management_fcn`, qui détermine les consignes de puissance (P_{ref}) à appliquer selon l'état de charge (SOC), la demande de puissance (P_{load}), et la dynamique des sources.

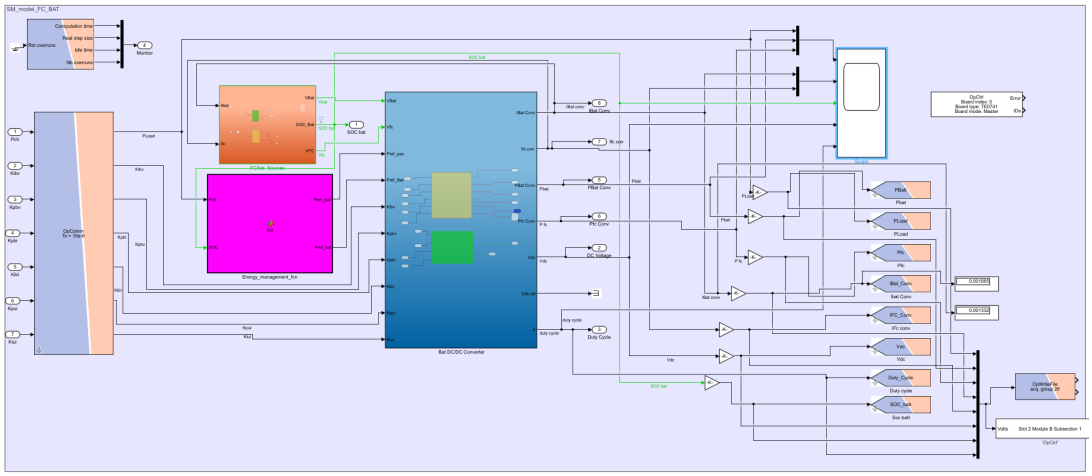


FIGURE IV.11 : Sous-système de commande (SM) : stratégie de gestion d'énergie et régulation

Les données mesurées (tension, courants, SOC) sont transmises depuis le SC vers le SM, où elles sont traitées pour calculer les consignes :

- $P_{\text{ref_PAC}}$, $P_{\text{ref_BAT}}$: puissances de référence.
- V_{dc}, I_{conv}, SOC : grandeurs physiques utilisées dans les boucles de régulation.

L'ensemble des signaux de commande sont renvoyés vers le modèle de puissance via le canal `OpComm`. Le système de supervision intégré permet de visualiser l'évolution des grandeurs en temps réel et d'évaluer la stabilité et la performance de la stratégie.

IV.4.3 Scénario 1 : Système a deux sources (PAC/Supercapacité)

Ce premier scénario vise à valider la stratégie de gestion d'énergie dans une configuration comportant une pile à combustible (PAC) comme source principale et une supercapacité (SC) comme source auxiliaire. L'objectif est de démontrer la capacité de la supercapacité à prendre en charge les fluctuations rapides de puissance, typiques des phases transitoires telles que les accélérations ou les freinages brusques.

La PAC, en raison de sa dynamique lente, n'est pas capable de répondre efficacement aux variations brusques de charge. Dans ce contexte, la SC joue un rôle crucial d'amortisseur énergétique, en absorbant ou en injectant rapidement de la puissance pour stabiliser la tension du bus continu. Ce scénario permet d'évaluer l'efficacité de la stratégie déterministe à distribuer les flux d'énergie de manière réactive, tout en préservant la stabilité de la PAC.

Ce scénario a pour **objectif principal** de valider expérimentalement l'efficacité de la supercapacité (SC) à absorber ou fournir rapidement des variations de puissance lors des phases transitoires du cycle de conduite. En effet, la pile à combustible (PAC), bien qu'elle soit la source principale d'énergie grâce à sa densité énergétique élevée, présente une dynamique lente et une sensibilité aux variations brutales de charge. La supercapacité, quant à elle, est particulièrement adaptée aux sollicitations rapides grâce à sa forte densité de puissance et son faible temps de réponse [203].

Dans cette configuration, la PAC est reliée à un convertisseur DC/DC unidirectionnel élévateur (boost), tandis que la supercapacité est interfacée par un convertisseur DC/DC bidirectionnel entrelacé flottant à quatre phases. Le système modélisé dans *MATLAB/Simulink* est exécuté en temps réel sur la plateforme **OPAL-RT**, avec une supervision dynamique assurée via l'interface graphique `sc_console` de RT-LAB. Le contrôle est basé sur une stratégie déterministe à base de règles : la supercapacité intervient uniquement lorsque la dérivée de la puissance demandée dépasse un seuil critique, fournissant ainsi un tampon énergétique temporaire.

Les tests sont réalisés en injectant des profils de puissance issus du cycle de conduite NEDC, incluant des phases d'accélération et de freinage régénératif. L'algorithme de gestion d'énergie distribue dynamiquement l'effort entre les deux sources, en veillant à ne pas solliciter excessivement la PAC. Les signaux mesurés (courants, tensions, SOC_{SC}, puissance délivrée) sont visualisés en temps réel via ScopeView et comparés aux simulations hors-ligne pour validation.

Ce scénario permet ainsi de démontrer l'intérêt de coupler une supercapacité à une PAC afin d'augmenter la réactivité du système et prolonger la durée de vie de la pile en réduisant ses gradients de courant.

L'expérience représentée dans la figure suivante a été conduite sur un banc temps réel utilisant la plateforme OPAL-RT (RT-LAB). Ce banc permet de simuler en temps réel le comportement du système hybride dans des conditions proches du fonctionnement réel, tout en intégrant des modèles numériques de la pile à combustible (PAC) et du supercondensateur (SC), associés à leurs convertisseurs respectifs.

L'objectif de cette expérimentation est de valider la stratégie hiérarchique de gestion d'énergie mise en œuvre, en vérifiant la répartition dynamique de la puissance entre la PAC et le supercondensateur selon les variations de la charge.

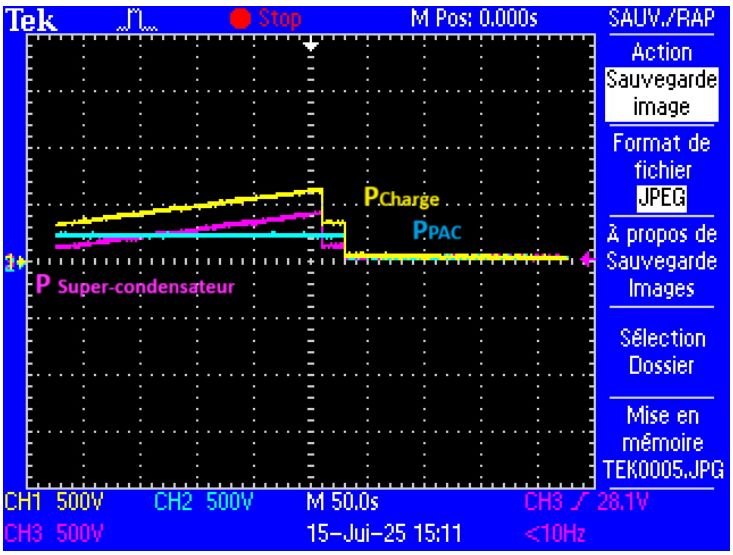


FIGURE IV.12 : Répartition expérimentale des puissances entre la PAC, le supercondensateur et la charge.

Trois grandeurs principales sont mesurées et affichées sur l'oscilloscope numérique Tektronix :

- **La courbe jaune** correspond à la puissance totale demandée par la charge (P_{charge}), représentant un profil dynamique simulé de conduite (type NEDC) avec des rampes de puissance ascendantes et descendantes.
- **La courbe bleue** traduit la puissance instantanée délivrée par la PAC (P_{PAC}). Elle suit une montée progressive après l'augmentation de la demande, en raison de la dynamique lente inhérente à la pile à combustible (limitations électrochimiques et thermiques).
- **La courbe rose** représente la puissance injectée par le supercondensateur (P_{SC}), qui réagit de manière quasi-instantanée pour compenser les écarts de puissance transitoire entre la charge et la PAC.

Cette configuration permet d'observer une coordination efficace entre les deux sources :

- Lors d'une brusque augmentation de la demande (zone de montée de P_{charge}), la PAC commence à augmenter sa puissance avec une certaine inertie, tandis que le SC fournit rapidement l'excédent pour garantir la stabilité de la tension de bus DC.
- Une fois la PAC stabilisée à son point de fonctionnement optimal, la puissance du SC décroît progressivement, assurant une transition fluide sans surtension ni oscillation.
- Lors d'une réduction brutale de la demande, le SC absorbe temporairement le surplus d'énergie (en mode recharge), soulageant ainsi la PAC de changements rapides de consigne.

Ces observations confirment le rôle clé du supercondensateur comme tampon dynamique à réponse rapide, en complément de la pile à combustible qui fournit la puissance moyenne de manière stable. La stratégie hiérarchique adoptée s'avère ainsi efficace pour répondre aux variations rapides de la charge tout en préservant la durée de vie de la PAC.

L'analyse de cette figure met en évidence le bon fonctionnement du découplage dynamique des sources. En phase transitoire, lorsque la puissance de charge augmente brutalement, la PAC répond progressivement à la demande jusqu'à atteindre sa puissance optimale. Durant cet intervalle, c'est le supercondensateur qui prend en charge le surplus de puissance, démontrant ainsi son rôle de tampon énergétique.

Dès que la demande diminue, le SC restitue moins de puissance, tandis que la PAC assure l'alimentation de base de manière stable. Cette coordination témoigne de l'efficacité de la stratégie hiérarchique implémentée et de la capacité du système à gérer dynamiquement les transitions de puissance tout en préservant la stabilité globale.

Cette validation expérimentale confirme ainsi les résultats obtenus en simulation et renforce la pertinence de l'architecture PAC–SC pour des profils de charge dynamiques.

IV.4.4 Scénario 2 : Système a deux sources (PAC/Batterie)

Ce deuxième scénario explore le couplage de la pile à combustible (PAC) avec une batterie lithium-ion. Contrairement à la supercapacité, la batterie présente une dynamique plus lente mais une capacité énergétique bien plus importante, ce qui la rend idéale pour assurer l'alimentation énergétique pendant des phases prolongées telles que les montées ou la conduite stabilisée.

La validation expérimentale dans ce cas vise à évaluer la performance de la stratégie déterministe dans la répartition de la puissance entre la PAC et la batterie, en fonction de l'état de charge (SOC), de la demande énergétique instantanée et des conditions du cycle de conduite imposé. La

batterie assure la continuité de service en cas de déficit transitoire ou de limitation dynamique de la PAC, tout en permettant sa recharge progressive lorsque les conditions le permettent.

L'objectif de ce second scénario est de valider l'efficacité de la batterie lithium-ion dans l'allègement de la charge imposée à la pile à combustible (PAC) sur des périodes prolongées. Contrairement à la supercapacité, la batterie dispose d'une capacité énergétique suffisante pour intervenir durablement, notamment durant les phases de conduite soutenue, de récupération d'énergie ou de forte demande.

Dans cette configuration, la stratégie déterministe de gestion d'énergie hiérarchise le fonctionnement de la PAC comme source principale, tandis que la batterie intervient de manière adaptative pour fournir un appoint énergétique ou récupérer l'excès disponible sur le bus DC. Le test est effectué sur la plateforme OPAL-RT avec une modélisation HIL complète, intégrant la PAC, la batterie et leur convertisseur respectif. Les consignes de tension et de courant sont imposées dynamiquement par un profil de cycle NEDC, et les échanges énergétiques sont enregistrés via `ScopeView` pour validation expérimentale.

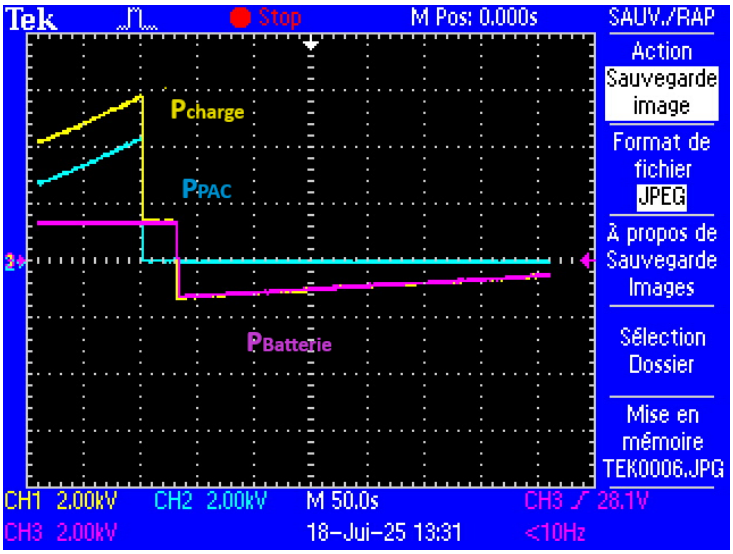


FIGURE IV.13 : Formes d'ondes expérimentales : répartition de puissance entre la pile à combustible (PAC) et la batterie

La figure IV.13 illustre les signaux de puissance mesurés en temps réel lors d'une expérience de gestion énergétique entre une pile à combustible (PAC) et une batterie lithium-ion. Les courbes affichées correspondent respectivement à :

- **La courbe magenta** correspond à la puissance totale consommée par la charge (P_{charge}).
- **La courbe jaune** traduit la puissance instantanée puissance fournie par (P_{PAC}).
- **La courbe cyan** représente la puissance puissance délivrée par la batterie (P_{Batt}),

L'analyse du comportement dynamique révèle plusieurs phases clés dans le fonctionnement du système :

Phase initiale (pré-déclenchement) :

Avant l'application de la charge, toutes les sources délivrent une puissance nulle ou très faible. La PAC est inactive ou en mode attente, tandis que la batterie reste non sollicitée, en cohérence avec une faible demande initiale.

Activation de la charge (palier de puissance) :

La courbe magenta montre une élévation rapide de la puissance consommée par la charge. La batterie réagit immédiatement en injectant un pic de puissance positif, témoignant de sa fonction de support dynamique. En effet, la pile à combustible étant caractérisée par une lenteur intrinsèque de réponse (due à ses processus électrochimiques internes), elle ne peut fournir immédiatement la totalité de l'énergie requise.

Transition dynamique (phase de compensation) :

La puissance de la PAC augmente progressivement en suivant une pente montante contrôlée, traduisant une montée en charge maîtrisée. Cette montée progressive vise à éviter les stress thermiques ou chimiques sur les composants de la pile. Simultanément, la batterie maintient sa contribution pour compenser le différentiel entre la puissance demandée et celle fournie par la PAC.

Stabilisation (régime établi) :

Lorsque la PAC atteint un niveau stable, suffisant pour alimenter à elle seule la charge, la puissance de la batterie diminue jusqu'à s'annuler. Ce comportement confirme que la stratégie de gestion d'énergie implémentée favorise une sollicitation minimale de la batterie, qui n'intervient que transitoirement. Ce choix permet d'augmenter la durée de vie des cellules en limitant les cycles charge/décharge rapides.

Bilan énergétique :

Cette expérience met en évidence la complémentarité entre la PAC et la batterie : la première assure la fourniture continue d'énergie en régime établi, tandis que la seconde assure la réponse rapide aux transitoires. L'interaction coordonnée des deux sources valide la logique de priorisation définie dans l'algorithme de gestion d'énergie embarqué, implémenté dans l'environnement OPAL-RT en mode HIL.

Les résultats expérimentaux obtenus à partir de la configuration hybride à deux sources (PAC–batterie) valident l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie développée. Les formes d'onde mesurées à l'oscilloscope confirment que le système est capable de suivre des profils dynamiques complexes tout en maintenant la stabilité de la tension d'alimentation. La stratégie adoptée assure non seulement une alimentation continue de la charge, mais également la préservation de la pile à combustible, en la maintenant dans sa zone de fonctionnement optimale. Cette validation expérimentale consolide la pertinence de cette approche pour des applications critiques telles que la mobilité électrique ou les micro-réseaux intelligents.

Cependant, malgré les performances satisfaisantes observées, certaines limites subsistent, notamment en matière de gestion des transitoires rapides et de réduction de la sollicitation cyclique de la batterie. En effet, la batterie, bien qu'efficace pour l'appoint énergétique, reste moins adaptée aux changements brusques de puissance, ce qui peut accélérer son vieillissement à long terme.

C'est dans ce contexte que l'introduction d'une troisième source (la supercapacité) se justifie pleinement. Grâce à sa très haute densité de puissance et son excellent temps de réponse, la supercapacité permet d'absorber les variations rapides de charge, limitant ainsi les contraintes sur la batterie et améliorant la dynamique globale du système. L'intégration d'une architecture PAC / batterie / supercapacité vise donc à conjuguer les avantages des trois technologies tout en optimisant la durabilité, la performance énergétique et la robustesse face aux transitoires. La section suivante analyse cette configuration avancée en détail, à travers des simulations et des validations expérimentales.

IV.4.5 Scénario 3 : Système a trois sources (PAC/SC/Batterie)

Le troisième scénario constitue l'étude la plus complète, intégrant les trois sources d'énergie dans une architecture hybride multi-sources : PAC, batterie et supercapacité. Ce scénario permet de tester la robustesse et l'efficacité de la stratégie de gestion déterministe face à des sollicitations complexes et variables, typiques des cycles de conduite urbains normalisés (NEDC ou WLTP).

La supercapacité est sollicitée pour amortir les pics de puissance de courte durée, tandis que la batterie prend en charge les phases plus longues. La PAC reste la source principale, dimensionnée pour fournir la majeure partie de l'énergie moyenne demandée. Ce cas d'étude met en lumière l'intérêt d'une coordination hiérarchique entre les sources et démontre la capacité du système à assurer un fonctionnement stable, réactif et énergétiquement optimisé dans un environnement HIL temps réel.

Ce troisième scénario vise à valider la stratégie globale de répartition dynamique de la puissance entre les trois sources d'énergie du système hybride : la pile à combustible (PAC), la batterie lithium-ion, et la supercapacité. Il constitue l'étape la plus complète de la validation expérimentale, testant la coordination et la complémentarité énergétique de toutes les sources dans des conditions de fonctionnement représentatives d'un cycle de conduite réel.

L'objectif principal est de démontrer la capacité de la stratégie déterministe à allouer intelligemment la puissance selon les besoins instantanés du système, tout en respectant les contraintes dynamiques et structurelles de chaque source. La PAC est sollicitée en priorité pour fournir l'énergie continue, tandis que la batterie intervient pour les demandes prolongées et la supercapacité pour les transitoires rapides.

Le modèle est exécuté en temps réel sur la plateforme OPAL-RT, en configuration *Hardware-in-the-Loop*, avec les profils NEDC comme consignes de puissance. L'analyse des performances est assurée à travers la mesure des courants, tensions, et états de charge, visualisés via `un oscilloscope` et enregistrés pour comparaison avec les résultats en simulation hors ligne.

L'expérience présentée dans la figure ci-dessous a été réalisée sur banc temps réel à l'aide de la plateforme OPAL-RT, dans le but de valider la stratégie de gestion d'énergie pour une architecture hybride à trois sources : pile à combustible (PAC), batterie et supercondensateur. Cette configuration vise à combiner les avantages respectifs de chaque source : la stabilité et la densité énergétique de la PAC, la flexibilité de la batterie, et la rapidité de réponse du supercondensateur.

La figure issue de l'oscilloscope Tektronix illustre l'évolution des puissances en fonction du temps :

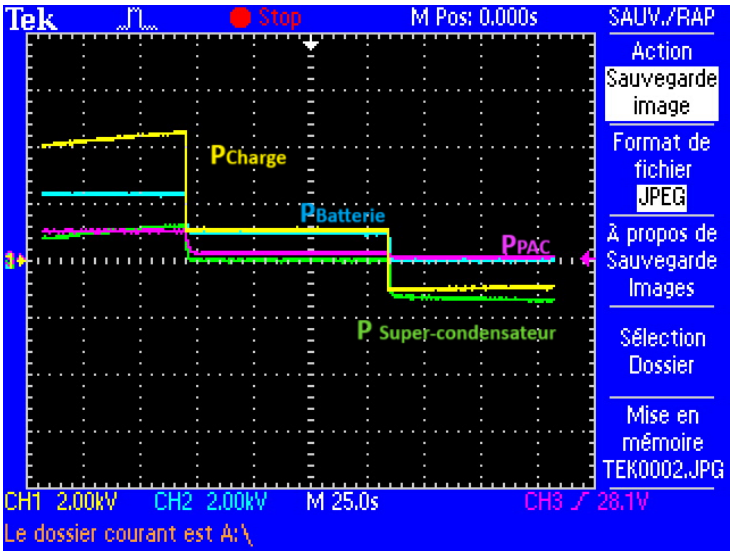


FIGURE IV.14 : Répartition expérimentale des puissances entre la PAC, la batterie, le supercondensateur et la charge sur banc OPAL-RT.

- **La courbe jaune** correspond à la puissance demandée par la charge (P_{charge}), qui augmente de manière dynamique avant de revenir à zéro.
- **La courbe violette** représente la puissance fournie par la PAC (P_{PAC}), qui monte progressivement après la montée de charge, puis reste quasi constante jusqu'à l'arrêt de la charge.
- **La courbe bleue** illustre la puissance délivrée par la batterie (P_{batt}), activée principalement pendant les phases de transition ou de soutien à la PAC.
- **La courbe verte** traduit la contribution du supercondensateur (P_{SC}), mobilisé pour les pics de puissance ou lors de variations rapides.

Analyse expérimentale et mise en valeur de l'architecture à trois sources

L'analyse approfondie de la figure expérimentale met en évidence le comportement harmonisé et hautement performant de l'architecture hybride à trois sources (pile à combustible, batterie et supercondensateur). Plusieurs observations clés permettent de souligner l'intelligence de cette intégration :

- Dès l'apparition d'une sollicitation rapide de la charge, le supercondensateur s'active instantanément pour compenser l'inertie dynamique de la pile à combustible, garantissant une transition sans à-coups.
- En parallèle, la batterie assure un soutien stable et intermédiaire, permettant d'éviter les variations brusques de courant, tout en préservant les autres sources.
- Une fois le régime stabilisé, la pile à combustible fournit progressivement la puissance principale, opérant dans sa zone optimale de rendement énergétique.
- À la baisse de la demande, les trois sources réagissent intelligemment : la pile réduit naturellement sa contribution, tandis que la batterie et le supercondensateur absorbent les excès de puissance, assurant une régulation fluide.

Ces résultats expérimentaux constituent une démonstration concrète et convaincante de l'efficacité de la stratégie de gestion hiérarchique déterministe développée dans ce travail. Cette stratégie permet une répartition intelligente et dynamique des flux de puissance selon la rapidité de réponse et la capacité énergétique propre à chaque source. Contrairement aux configurations binaires PAC/Batterie ou PAC/Supercondensateur, qui présentent des limitations en termes de réactivité ou d'autonomie, l'assemblage tri-source exploite pleinement les complémentarités :

- **Réactivité ultra-rapide** du supercondensateur pour les transitoires,
- **Stabilité énergétique** et capacité de réserve de la batterie,
- **Production continue et efficiente** de la pile à combustible.

Ainsi, l'approche proposée combine performance, robustesse et durabilité. Elle constitue une solution avancée pour les applications exigeantes telles que les véhicules électriques, en assurant une continuité de service optimale, une meilleure exploitation énergétique, et une réduction significative des contraintes sur la pile à combustible. Cette architecture représente l'aboutissement du travail de recherche mené et justifie pleinement le choix d'un système tri-source, dont la supériorité est désormais validée par des résultats expérimentaux solides.

IV.5 Comparaison entre les architectures proposées

L'évaluation comparative des différentes architectures hybrides basées sur la pile à combustible (Fuel Cell, FC) est essentielle pour concevoir des systèmes énergétiques performants, fiables et adaptés aux contraintes des applications électromobiles. Trois architectures principales sont couramment étudiées : l'association FC/SC (pile à combustible + supercapacité), FC/Batt (pile à combustible + batterie), et FC/SC/Batt (tripartite). Chacune de ces structures présente des avantages et limitations spécifiques, et leur comparaison permet d'identifier la solution optimale selon le profil d'usage visé.

La configuration FC/SC est caractérisée par une réponse dynamique rapide grâce aux faibles constantes de temps des supercapacités. Elle est particulièrement adaptée aux situations où des pics de puissance sont fréquents, comme les phases d'accélération ou de freinage régénératif. Cependant, cette architecture présente une autonomie limitée, car les supercapacités possèdent une densité d'énergie relativement faible, ce qui les rend insuffisantes pour des cycles prolongés. La supercapacité agit donc comme un stabilisateur de puissance, soulageant la pile à combustible des transitoires rapides et prolongeant sa durée de vie opérationnelle [204].

La configuration FC/Batt, en revanche, offre une capacité énergétique significative grâce à la batterie, permettant une autonomie étendue et une adaptation aux cycles d'usage longue durée. La batterie sert de tampon d'énergie intermédiaire, capable d'absorber ou de restituer de la puissance avec une dynamique modérée. Toutefois, la limitation principale de cette structure réside dans la contrainte de cyclage profond imposée à la batterie lors des fortes variations de charge, ce qui accélère son vieillissement et nécessite une stratégie de gestion de charge/décharge rigoureuse [205].

Enfin, la configuration FC/SC/Batt combine les avantages des deux précédentes en assurant à la fois la fourniture d'énergie à long terme via la batterie, la réponse dynamique rapide via la supercapacité, et une alimentation moyenne régulée par la pile à combustible. Cette architecture tri-source offre une flexibilité opérationnelle maximale et une meilleure résilience face aux variations de charge, au prix toutefois d'un dimensionnement plus complexe, d'une gestion d'énergie plus élaborée, et d'un coût d'intégration accru [206].

La comparaison de ces configurations permet non seulement d'analyser leurs performances en termes d'efficacité énergétique, de vieillissement des composants, et de stabilité des tensions d'alimentation, mais également d'évaluer leur pertinence vis-à-vis d'un cahier des charges spécifique (mobilité légère, véhicule utilitaire, production stationnaire, etc.). Elle constitue une étape clé dans le processus de sélection technologique et d'optimisation de la stratégie de gestion d'énergie. Dans ce contexte, des tests comparatifs en simulation et/ou en expérimentation permettent de quantifier précisément les apports respectifs de chaque source, et de valider les architectures en termes de fiabilité et de durabilité.

IV.5.1 Analyse des résultats

Afin d'évaluer les performances des différentes architectures hybrides étudiées dans le cadre de ce travail de recherche, un ensemble de critères de comparaison a été défini. Ces critères permettent d'analyser de manière objective et structurée les capacités fonctionnelles, énergétiques et dynamiques des trois architectures proposées, à savoir : FC/SC, FC/Batt, et FC/SC/Batt.

L'évaluation comparative repose sur des simulations détaillées sous MATLAB/Simulink, ainsi que sur des tests temps réel effectués sur la plateforme OPAL-RT. Les résultats obtenus permettent d'étudier le comportement de chaque configuration selon plusieurs indicateurs clés, présentés dans les sections suivantes.

IV.5.1.1 Analyse selon l'état de charge du super-condensateur

Parmi les critères avancés pour l'évaluation des architectures hybrides à base de pile à combustible, l'état de charge (State of Charge, SoC) du supercondensateur constitue un indicateur essentiel. En effet, ce paramètre conditionne directement la capacité du système à répondre à une demande de puissance transitoire ou à absorber une surcharge temporaire. La rapidité de charge et de décharge du supercondensateur impose une gestion très réactive de son SoC, avec des seuils critiques à maintenir pour garantir une performance optimale et éviter les surtensions.

Dans la configuration FC/SC, le SoC du supercondensateur joue un rôle central. L'absence de batterie empêche tout relais énergétique lorsque le SC atteint ses limites. Ainsi, une stratégie de gestion doit continuellement équilibrer la puissance entre la pile à combustible (source lente) et le SC (source rapide), avec des contraintes fortes pour éviter un épuisement ou une surcharge du SC. Un SoC faible compromet la capacité à fournir des pics de puissance, tandis qu'un SoC élevé limite la possibilité de récupération d'énergie lors d'un freinage.

Dans la configuration FC/Batt, le rôle du supercondensateur étant absent, le critère du SoC ne s'applique pas directement. La gestion des états de charge repose sur le SoC de la batterie, qui varie plus lentement et impose une sollicitation plus intensive de celle-ci lors des demandes transitoires, accélérant ainsi son vieillissement.

En revanche, dans la configuration FC/SC/Batt, le SoC du supercondensateur est utilisé comme levier d'équilibrage dynamique. Lorsqu'il est supérieur à un seuil minimal, il est prioritairement sollicité pour les besoins de puissance instantanée, protégeant ainsi la batterie. En situation de SoC faible, la batterie prend le relais pour stabiliser le bus DC, tandis que la pile à combustible alimente la recharge progressive du SC. Cette approche assure une résilience accrue et optimise la longévité des composants énergétiques. Le SoC du SC devient alors un signal d'entrée critique dans la stratégie de gestion d'énergie multi-sources, conditionnant la commutation des flux de puissance.

Ainsi, l'intégration du SoC du supercondensateur comme critère de gestion différencie significativement les configurations. Elle permet, notamment dans l'architecture tri-source, une

priorisation dynamique des sources et une réduction significative du stress électrochimique sur la batterie.

IV.5.1.2 Analyse selon l'état de charge de la batterie

L'état de charge (State of Charge, SoC) de la batterie constitue un critère déterminant pour l'analyse comparative des architectures hybrides intégrant une pile à combustible. Ce paramètre reflète à la fois l'énergie disponible, la capacité de réponse à une demande ponctuelle, et l'impact à long terme sur le vieillissement électrochimique de la batterie. Une gestion appropriée du SoC est donc essentielle pour assurer la fiabilité du système et prolonger la durée de vie de la batterie.

Dans la configuration FC/Batt, la batterie est la seule source auxiliaire à la pile à combustible. Elle joue à la fois le rôle de tampon énergétique et de soutien dynamique. Par conséquent, son SoC est soumis à des variations significatives, notamment en présence de profils de puissance fluctuants. En l'absence de supercapacité, la batterie absorbe également les transitoires rapides, ce qui augmente le taux de cyclage profond et accélère sa dégradation. Il est donc impératif d'implémenter une stratégie de gestion conservatrice, visant à maintenir le SoC dans une plage optimale (généralement entre 20 % et 80 %), afin de préserver la capacité et d'éviter les dérives thermiques [204].

Dans la configuration FC/SC, l'absence de batterie empêche toute gestion basée sur le SoC de cette dernière. Le système repose uniquement sur le couple FC/SC, limitant l'autonomie énergétique et la capacité à répondre durablement aux besoins de puissance moyenne. Ce manque de capacité tampon rend le système plus vulnérable à des variations prolongées de charge.

En revanche, la configuration FC/SC/Batt offre une flexibilité accrue dans la gestion du SoC de la batterie. Grâce à la présence de la supercapacité, la batterie est moins sollicitée durant les transitoires, ce qui permet de mieux maîtriser ses cycles de charge/décharge. Le SoC évolue plus lentement, dans une plage réduite, et peut être régulé de manière proactive en fonction du niveau d'énergie de la PAC et du SoC du supercondensateur. Cela favorise une exploitation plus douce, réduit le stress thermique et chimique, et améliore significativement la durée de vie du système batterie. De plus, dans cette architecture tri-source, le SoC de la batterie devient un paramètre clé pour orienter les décisions de la stratégie de gestion d'énergie : par exemple, en cas de SoC élevé, la batterie peut alimenter directement la charge pour soulager la PAC ; à l'inverse, si le SoC est faible, la recharge est priorisée via la PAC pendant les phases de faible demande.

En somme, la dynamique du SoC de la batterie constitue un indicateur essentiel de la qualité de l'architecture énergétique et de l'intelligence de la stratégie de gestion. L'architecture FC/SC/Batt, en particulier, permet une exploitation équilibrée du SoC, limitant les dérives et garantissant une meilleure fiabilité à long terme.

IV.5.1.3 Analyse selon la consommation de la pile à combustible

Un critère fondamental dans la comparaison des architectures hybrides basées sur la pile à combustible (FC) est la consommation en hydrogène, directement liée à la quantité d'énergie demandée à la PAC. La réduction de cette consommation permet non seulement d'optimiser l'autonomie du système mais aussi de préserver la durée de vie de la pile, qui est sensible aux variations rapides de charge et aux cycles fréquents d'activation/désactivation.

Dans la configuration FC/SC, la supercapacité est fortement sollicitée pour absorber les pics de puissance, ce qui permet de lisser partiellement les appels de courant adressés à la pile à combustible. Toutefois, en l'absence d'une source intermédiaire à haute densité d'énergie comme une batterie, la PAC reste fortement sollicitée pour alimenter la totalité de la consommation

moyenne du système. Cela conduit à une consommation en hydrogène globalement élevée, surtout lors de cycles prolongés, car la pile fonctionne à un régime proche de sa puissance nominale.

La configuration FC/Batt permet une meilleure répartition de la charge moyenne entre la PAC et la batterie. En particulier, la batterie peut être utilisée pour fournir de l'énergie pendant les périodes de forte demande, tandis que la pile fonctionne dans une plage de puissance optimisée (zone de rendement maximal). Cette approche permet de réduire la consommation instantanée d'hydrogène en maintenant la PAC dans un régime stationnaire, mais au prix d'une sollicitation accrue de la batterie, ce qui peut affecter sa durabilité.

La configuration FC/SC/Batt représente le compromis optimal. Elle permet de minimiser la consommation de la pile à combustible grâce à une gestion d'énergie multicritère : la PAC alimente principalement les charges moyennes à basse dynamique, la batterie prend en charge les phases transitoires longues, et la supercapacité gère les appels de puissance très rapides. En maintenant la pile dans une plage de fonctionnement stable, on réduit les phases de montée en charge, les appels impulsionnels, ainsi que les inefficacités associées aux transitions fréquentes de régime. Cette stratégie permet d'atteindre une réduction significative de la consommation d'hydrogène (jusqu'à 15–20 % selon les études) par rapport aux autres configurations [55, 207].

IV.5.1.4 Analyse selon la robustesse

La robustesse d'une stratégie de gestion d'énergie dans un système hybride multi-sources désigne sa capacité à maintenir la stabilité, l'efficacité énergétique et la sécurité opérationnelle du système face aux incertitudes, aux perturbations et aux conditions extrêmes. Cette notion est essentielle dans le contexte des applications embarquées, telles que les véhicules électriques ou les systèmes autonomes, où les profils de charge sont fortement variables et imprévisibles.

Une stratégie robuste doit être capable d'assurer la continuité de service en dépit de variations rapides de la demande en puissance, de fluctuations de tension au niveau des sources, de la dégradation progressive des composants (ex. : vieillissement de la batterie), ou encore de la présence de défauts partiels (capteur défaillant, court-circuit partiel). Dans notre étude, la stratégie de gestion d'énergie repose sur un algorithme déterministe, formulé à partir de règles logiques prenant en compte les états de charge (SoC) de la batterie et du supercondensateur, ainsi que la puissance disponible ou requise par la pile à combustible. Ce système de règles permet de prioriser les sources selon leur nature : les supercapacités pour les appels de puissance rapide, la batterie pour les transitoires moyens, et la pile à combustible pour la fourniture de puissance continue. Cette approche garantit une bonne répartition des efforts et permet d'éviter la surcharge ou le sous-dimensionnement d'un des composants et la robustesse de la stratégie de l'architecture à trois sources se résume dans les points suivants :
(i) la stabilité des tensions sur le bus DC,
(ii) la capacité à assurer la charge en cas de perte d'une source temporaire,
(iii) la limitation des cycles profonds de la batterie, et
(iv) la résilience face aux perturbations (bruits sur les mesures, erreurs de communication, délais de réponse).
Des scénarios de test incluant des décharges rapides, des variations de pente de charge, des coupures simulées de la pile à combustible et des insertions de défauts de capteurs ont été utilisés pour valider la robustesse de la stratégie.

Les résultats expérimentaux montrent que la stratégie mise en œuvre maintient un fonctionnement stable du système dans tous les cas testés, avec une redistribution rapide des flux d'énergie vers les sources encore disponibles. Elle assure également le respect des contraintes opérationnelles des composants, en maintenant les SoC dans les plages admissibles et en évi-

tant les oscillations ou instabilités du courant de sortie. Ces performances valident la robustesse fonctionnelle et énergétique de la stratégie face aux perturbations internes comme externes.

Ainsi, la robustesse d'une stratégie de gestion d'énergie n'est pas seulement une propriété théorique mais une exigence pratique pour garantir la sécurité, l'efficacité et la durabilité des systèmes hybrides électrochimiques dans des environnements réels.

Le tableau IV.2 propose une vue d'ensemble comparative des configurations FC/SC, FC/Batt et FC/SC/Batt, selon l'ensemble de critères techniques et fonctionnels analysés dans les sections précédentes.

Tableau IV.2: Critères de comparaison des configurations hybrides FC/SC, FC/Batt et FC/SC/Batt

Critères	**FC/SC**	**FC/Batt**	**FC/SC/Batt**
Réponse dynamique	Excellente	Moyenne	Excellente
Autonomie énergétique	Très faible	Élevée	Élevée
Capacité à absorber les pics de puissance	Très bonne	Moyenne	Très bonne
Vieillissement des composants	Faible (PAC + SC)	Élevé (batterie sollicitée)	Modéré (répartition intelligente)
Complexité de gestion	Moyenne	Moyenne	Élevée
Coût du système	Faible à moyen	Moyen	Élevé
Efficacité énergétique globale	Moyenne	Bonne	Très bonne
Souplesse d'exploitation	Moyenne	Moyenne	Excellente
Robustesse face aux défauts	Moyenne	Moyenne	Élevée (redondance énergétique)

IV.6 Conclusion

Les expérimentations menées sur la plateforme temps réel OPAL-RT ont permis de valider l'efficacité des stratégies de gestion d'énergie développées, reposant sur une approche déterministe à base de règles. L'environnement Hardware-in-the-Loop (HIL) a offert un cadre de test sûr, flexible et représentatif, permettant de reproduire fidèlement des conditions de fonctionnement réelles sans recourir à des prototypes matériels qui coûte très cher.

Les résultats obtenus confirment la capacité de la stratégie à répartir de manière intelligente et réactive la puissance entre les différentes sources (pile à combustible, batterie et supercapacité), tout en garantissant la stabilité des régulations courant/tension. La plateforme HIL a également permis d'identifier d'éventuelles limitations liées aux délais de commutation, à la saturation de certains composants, ou encore aux priorités de gestion dynamique.

Cette validation préliminaire constitue une étape essentielle avant le déploiement sur banc physique. Elle confirme la pertinence de l'architecture hybride choisie et de la logique de commande associée, tout en ouvrant la voie à des perspectives d'optimisation futures par intégration de techniques adaptatives ou prédictives.

Conclusion Générale et perspectives

Ce travail de recherche s'inscrit dans le développement de systèmes d'énergie hybrides intelligents pour la mobilité électrique et porte sur la modélisation, la commande et la validation temps réel (HIL) d'une architecture multi-sources réunissant une pile à combustible (PAC), une batterie lithium-ion et une supercapacité, interfacées par des convertisseurs DC/DC entrelacés. Il se décline en **deux volets complémentaires** :
Gestion de l'énergie, conception et mise en œuvre d'une stratégie déterministe hiérarchique assurant une répartition optimale des puissances en conditions dynamiques réelles (PAC , batterie pour les variations lentes et soutenues, supercapacité pour les transitoires rapides et la régénération), avec régulation courant–tension des convertisseurs ;
Surveillance et diagnostic, développement d'un observateur non linéaire en mode glissant (ordre 2) pour l'estimation robuste en temps réel de l'état de charge (SoC) et d'un indicateur d'état de santé (SoH), ainsi que la détection précoce des défauts critiques (dérives de capteurs de tension, courts-circuits internes associés notamment à la formation de dendrites). L'ensemble a été validé par une campagne conjointe de simulation multi-physique sous MATLAB/Simulink et d'expérimentation sur plateforme temps réel OPAL-RT (RT-LAB) en configuration *Hardware-in-the-Loop*, démontrant robustesse, performance énergétique et tolérance aux défauts dans des scénarios représentatifs d'usage.

Dans un premier temps, un état de l'art détaillé a été réalisé sur les sources d'énergie embarquées, les structures de conversion associées, les stratégies de gestion d'énergie, ainsi que les méthodes d'observation et de détection de défauts. Cette analyse a permis de positionner clairement la contribution scientifique de ce travail au sein des recherches actuelles sur les systèmes énergétiques hybrides embarqués. Il en est ressorti que le couplage judicieux de plusieurs sources complémentaires, associé à des stratégies de gestion intelligentes, constitue une voie prometteuse pour répondre aux exigences croissantes de stabilité, d'autonomie et de sécurité dans les applications embarquées.

Par la suite, trois architectures hybrides ont été modélisées et étudiées : PAC–supercapacité, PAC–batterie, puis PAC–batterie–supercapacité. Chacune d'entre elles a fait l'objet d'une modélisation dynamique sous MATLAB/Simulink en tenant compte des caractéristiques spécifiques de chaque source et de leurs convertisseurs associés (unidirectionnels ou bidirectionnels entrelacés à quatre phases). Une stratégie de gestion d'énergie déterministe à base de règles a été développée, hiérarchisant le rôle de chaque source selon la charge, l'état de charge (SOC), les seuils de puissance et les conditions de conduite. Cette stratégie a été testée sous différents profils de conduite standards (NEDC), démontrant une répartition efficace des flux de puissance, la réduction des sollicitations de la PAC et une amélioration notable de la stabilité de la tension du bus DC.

L'architecture triphasée, combinant PAC, batterie et supercapacité, a montré des perfor-

mances supérieures aux architectures à deux sources, tant en termes de réactivité dynamique que de durabilité des composants. Le supercondensateur s'est révélé particulièrement efficace pour absorber les pics de puissance grâce à son faible temps de réponse, tandis que la batterie a assuré la régulation intermédiaire, et la PAC a fonctionné dans sa zone optimale avec des transitions en douceur.

Sur le plan de la surveillance et de la fiabilité, un observateur non linéaire en mode glissant a été conçu pour estimer en temps réel le SOC de la batterie et détecter deux types de défauts critiques : les défauts de capteur de tension et les courts-circuits internes. Pour cela, un modèle de Thévenin d'ordre 2 a été formulé en représentation d'état, assurant une base robuste pour la conception de l'observateur. Afin d'améliorer la détection précoce des défauts internes, la méthode CUSUM (Cumulative Sum) a été couplée à l'observateur, apportant une capacité statistique de décision et augmentant la fiabilité globale du diagnostic embarqué.

Tous les développements ont été validés expérimentalement sur la plateforme OPAL-RT à travers des tests Hardware-in-the-Loop (HIL), en environnement temps réel. Ces essais ont confirmé la fidélité des modèles développés, la pertinence de la stratégie de gestion d'énergie et l'efficacité du diagnostic basé sur l'observation. Les résultats obtenus valident le choix des architectures et des approches de commande retenues, tout en ouvrant la voie à plusieurs perspectives de recherche.

En perspective, ces travaux ouvrent la voie à plusieurs axes d'amélioration. L'intégration d'algorithmes d'intelligence artificielle, tels que les réseaux de neurones ou les méthodes d'apprentissage par renforcement, pourrait permettre d'optimiser dynamiquement la gestion des flux d'énergie en s'adaptant de manière plus fine aux conditions de charge, aux profils de mission et à l'état des sources.

Par ailleurs, l'extension de la fonction de diagnostic à d'autres types de défauts, notamment les déséquilibres intercellules, les dérives de température ou les dégradations thermiques, permettrait d'accroître la couverture diagnostique du système. L'ajout de capteurs complémentaires, associés à des modèles d'estimation avancés, pourrait enrichir la surveillance sans compromettre la légèreté computationnelle des solutions embarquées.

Enfin, l'application des méthodologies développées à d'autres configurations hybrides (systèmes photovoltaïques, micro-réseaux, véhicules hybrides lourds) ou à des architectures plus complexes (intégration multi-niveaux ou multi-batteries) représenterait un prolongement naturel de cette recherche. Ces adaptations pourraient favoriser la démocratisation de solutions énergétiques plus fiables, plus sûres et mieux dimensionnées pour les défis de l'électrification future. Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives se dégagent :

- Le développement d'une stratégie de gestion d'énergie à base d'intelligence artificielle, notamment par apprentissage par renforcement ou logique floue adaptative, afin de permettre une prise de décision optimale dans des environnements incertains.

- L'extension de la plateforme HIL à des cycles de conduite plus sévères ou à des profils urbains réels mesurés, pour mieux évaluer le comportement du système en conditions extrêmes.

- L'étude de l'impact des températures extrêmes sur la performance des sources hybrides, avec modélisation thermique et couplage thermo-électrique, en vue d'une gestion thermique intégrée.

En conclusion, cette thèse propose une contribution complète et structurée à la conception, la commande et la validation de systèmes d'énergies hybrides. L'assemblage coordonné de trois

sources énergétiques, couplé avec une stratégie de gestion hiérarchique robuste et à une surveillance avancée des défauts, représente une solution prometteuse pour les systèmes de transport électrifiés et pour les réseaux énergétiques intelligents de demain.

Références bibliographiques

[1] H. Wang, Y. Huang, H. He, C. Lv, W. Liu et A. Khajepour. « Energy management of hybrid electric vehicles ». In : *Modeling, Dynamics and Control of Electrified Vehicles* (2018), p. 159-206.

[2] T. D. Patil. « Study of the environmental impacts of a plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) in the context of optimal sizing and use ». Thèse de doct. École Nationale des Travaux Publics de l'État [ENTPE], 2024.

[3] D. Lanzarotto, M. Marchesoni, M. Passalacqua, A. P. Prato et M. Repetto. « Overview of different hybrid vehicle architectures ». In : *IFAC-PapersOnLine* 51.9 (2018), p. 218-222.

[4] A. Benevieri et al. « Series architecture on hybrid electric vehicles: A review ». In : *Energies* 14.22 (2021), p. 7672.

[5] A. Sciarretta, M. Back et L. Guzzella. « Optimal control of parallel hybrid electric vehicles ». In : *IEEE Transactions on control systems technology* 12.3 (2004), p. 352-363.

[6] B. Kabalan, E. Vinot, Y. Cheng, R. Trigui et C. Dumand. « Improvement of a series-parallel hybrid electric vehicle architecture ». In : *2017 IEEE vehicle power and propulsion conference (VPPC)*. IEEE. 2017, p. 1-6.

[7] C. Mi et M. A. Masrur. *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. John Wiley & Sons, 2025.

[8] J.-M. Tarascon. « Key challenges in future Li-battery research ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368.1923 (2010), p. 3227-3241.

[9] F. Liu, Y.-p. Liu, W.-x. Su, C.-p. Jiao et Y. Liu. « Online estimation of lithium-ion batteries state of health during discharge ». In : *International Journal of Energy Research* 45.7 (2021), p. 10112-10128.

[10] A.-K. Srouji, L. J. Zheng, R. Dross, D. S. Aaron et M. M. Mench. « The role of water management on the oxygen transport resistance in polymer electrolyte fuel cell with ultra-low precious metal loading ». In : *Journal of Power Sources* 364 (2017), p. 92-100.

[11] A. Burke. « Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles ». In : *International Journal of Energy Research* 34.2 (2010), p. 133-151.

[12] Y. Wu et H. Gao. « Optimization of fuel cell and supercapacitor for fuel-cell electric vehicles ». In : *IEEE transactions on Vehicular Technology* 55.6 (2006), p. 1748-1755.

[13] P. Thounthong, S. Rael et B. Davat. « Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications ». In : *Journal of power sources* 193.1 (2009), p. 376-385.

[14] H. Marzougui, A. Mansour, K. Ameni, F. Bacha et J. Ghouili. « Energy management of fuel cell/battery/ultracapacitor in electrical hybrid vehicle ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 42.13 (2017), p. 8857-8869.

[15] W. Zhang, M. Zhong, J. Han, Y. Sun et Y. Wang. « Research on the strategy of lithium-ion battery–supercapacitor hybrid energy storage to suppress power fluctuation of direct current microgrid ». In : *International Journal of Low-Carbon Technologies* 17 (2022), p. 1012-1017.

[16] Z. Abdin, A. Zafaranloo, A. Rafiee, W. Mérida, W. Lipiński et K. R. Khalilpour. « Hydrogen as an energy vector ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120 (2020), p. 109620.

[17] S. Hussain, M. U. Ali, G.-S. Park, S. H. Nengroo, M. A. Khan et H.-J. Kim. « A Real-Time Bi-Adaptive Controller-Based Energy Management System for Battery–Supercapacitor Hybrid Electric Vehicles ». In : *Energies* 12.24 (2019), p. 4662.

[18] F. H. Gandoman et al. « Concept of reliability and safety assessment of lithium-ion batteries in electric vehicles: Basics, progress, and challenges ». In : *Applied Energy* 251 (2019), p. 113343.

[19] B.-H. Nguyen, R. German, J. P. F. Trovão et A. Bouscayrol. « Real-time energy management of battery/supercapacitor electric vehicles based on an adaptation of Pontryagin's minimum principle ». In : *IEEE transactions on Vehicular Technology* 68.1 (2018), p. 203-212.

[20] M. Abdelli. « Étude des batteries à base de lithium ». Mémoire académique. Mém. de mast. Alger, Algérie : École Nationale Polytechnique (ENP), Alger, 2018.

[21] T. S. Babu, K. R. Vasudevan, V. K. Ramachandaramurthy, S. B. Sani, S. Chemud et R. M. Lajim. « A comprehensive review of hybrid energy storage systems: Converter topologies, control strategies and future prospects ». In : *Ieee Access* 8 (2020), p. 148702-148721.

[22] A. Sciarretta, M. Back et L. Guzzella. « Optimal control of hybrid vehicles ». In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 23.3 (2015), p. 1197-1204.

[23] B. Huang, W. Yu, M. Ma, X. Wei et G. Wang. « Artificial-Intelligence-Based Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles: A Comprehensive Review ». In : *Energies* 18.14 (2025), p. 3600.

[24] K. Yahia, A. Chibani, H. Trabelsi et L. Krichen. « Energy management strategy for hybrid electric vehicles based on deep reinforcement learning ». In : *Energy Conversion and Management* 243 (2021), p. 114399.

[25] A. Guelailia, L. Boulon et K. Agbossou. « Artificial intelligence-based energy management strategies for hybrid electric vehicles: Recent advances and future challenges ». In : *Applied Energy* 335 (2023), p. 120695.

[26] L. Zhang et C. Wang. « Thermal Control in Hybrid Energy Storage Systems ». In : *Applied Energy* 287 (2021), p. 116572.

[27] Y. Zhao, L. Jin et Q. Wu. « Adaptive real-time energy management strategy for hybrid electric vehicles using driving pattern recognition and dynamic programming ». In : *Applied Energy* 257 (2020), p. 113961.

[28] C. Ghenai, A. Merabet et T. Salameh. « Review of energy management strategies in hybrid energy systems for transportation and microgrid applications ». In : *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 52 (2022), p. 102107.

[29] X. Zhang et al. « Advances in fuel cell technology: Materials, performance, and applications ». In : *Energy Reports* 7 (2021), p. 205-218.

[30] M. Steele. « Fundamentals of electrochemical energy conversion in fuel cells ». In : *Electrochimica Acta* 320 (2020), p. 112-128.

[31] J. Larminie et A. Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, 2019.

[32] P. Strasser. « Electrocatalysis and reaction kinetics in fuel cells ». In : *Chemical Reviews* 119 (2019), p. 791-874.

[33] B. C. Huber et al. « Development and application of polymer electrolyte membrane fuel cells ». In : *Journal of Power Sources* 400 (2018), p. 45-67.

[34] R. O'Hayre et al. *Fuel Cell Fundamentals*. Wiley, 2017.

[35] A. Tiwari et al. « Recent progress in solid oxide fuel cell technology ». In : *Energy and Environmental Science* 13 (2020), p. 345-368.

[36] D. Papageorgopoulos. « High-temperature polymer electrolyte membrane fuel cells ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2021), p. 12035-12050.

[37] M. L. Perry et T. F. Fuller. « A historical perspective of fuel cell technology in transportation ». In : *Journal of Electrochemical Society* 162 (2018), A1282-A1295.

[38] S. Mekhilef et al. « Renewable energy storage: Hydrogen and fuel cell technologies ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 126 (2020), p. 10983.

[39] G. Hoogers. *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC Press, 2021.

[40] D. Stolten et B. Emonts. *Hydrogen Science and Engineering*. Wiley, 2018.

[41] J. C. Amphlett et al. « Performance characteristics of alkaline fuel cells ». In : *Energy Reports* 6 (2020), p. 98-112.

[42] A. Cooper et al. « Hydrogen fuel cell applications in transportation ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2019), p. 32011-32025.

[43] P. Spath et M. Mann. « Life cycle assessment of hydrogen production via fuel 170 cell ». In : *Journal of Cleaner Production* 18 (2019), p. 107-123.

[44] B. J. Pollet. *Hydrogen Energy: Challenges and Applications*. Elsevier, 2021.

[45] B. E. Conway. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York : Springer, 1999.

[46] A. F. Burke. « Ultracapacitors: why, how, and where is the technology ». In : *Journal of Power Sources* 91 (2000), p. 37-50.

[47] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, P. V. den Bossche et J. V. Mierlo. « Critical review of State of Health estimation methods of Li-ion batteries for real applications ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016), p. 572-587.

[48] W. He, N. Williard, C. Chen et M. Pecht. « State of health estimation for lithium-ion batteries using a combination of model-based and data-driven approaches ». In : *Journal of Power Sources* 206 (2012), p. 15-26.

[49] H. Tazvinga, B. Zhu, X. Xia et B. P. Numbi. « A review of battery technologies for renewable energy systems: Integration, sizing and techno-economic aspects ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021), p. 110178.

[50] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua et M. Ouyang. « A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles ». In : *Journal of Power Sources* 226 (2013), p. 272-288.

[51] C. Sun, S. J. Moura, M. Krstic et A. F. Bower. « Dynamic traffic power profile optimization for battery electric vehicles ». In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 25.6 (2017), p. 1882-1891.

[52] M. Armand et J. M. Tarascon. « Building better batteries ». In : *Nature* 579 (2020), p. 337-346.

[53] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee et G. Yushin. « Li-ion battery materials: present and future ». In : *Materials Today* 18.5 (2015), p. 252-264.

[54] T. Mesbahi, F. Khenfri, N. Rizoug, K. Chaaban, P. Bartholomeüs et P. Le Moigne. « Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid Particle Swarm–Nelder–Mead (PSO–NM) optimization algorithm ». In : *Electric power systems research* 131 (2016), p. 195-204.

[55] Y. Zhang, F. Blaabjerg et Y. Yang. « Power control strategies for fuel cell hybrid power systems in electric vehicles: A review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114 (2019), p. 109336.

[56] N. Chaturvedi, S. Ahmad et A. Mehmood. « Energy management of hybrid energy storage system in electric vehicles: A review of control strategies and future research directions ». In : *Journal of Energy Storage* 43 (2021), p. 103239.

[57] B. Tifour, M. Boukhnifer, A. Hafaifa et C. Tanougast. « Monitoring and control of energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle using fuzzy approach ». In : *Diagnostyka* 21 (2020), p. 39-48.

[58] M. Ehsani, K. V. Singh, H. O. Bansal et R. T. Mehrjardi. « State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles ». In : *Proceedings of the IEEE* 109.6 (2021), p. 967-984.

[59] B. Bendjedia, N. Rizoug, M. Boukhnifer, F. Bouchafaa et M. Benbouzid. « Influence of secondary source technologies and energy management strategies on Energy Storage System sizing for fuel cell electric vehicles ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 43.25 (2018), p. 11614-11628.

[60] K. W. E. Cheng, B. Divakar, H. Wu, K. Ding et H. F. Ho. « Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles ». In : *IEEE transactions on vehicular technology* 60.1 (2010), p. 76-88.

[61] J. Zhao et al. « Review of lithium-ion battery fault features, diagnosis methods, and diagnosis procedures ». In : *IEEE Internet of Things Journal* 11.11 (2023), p. 18936-18950.

[62] G. L. Plett. *Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods*. Artech House, 2015.

[63] S. Farajdadian. « Recent developments of multiport DC/DC converter: a topology and control perspective ». In : *Energy Reports* 11 (2024), p. 1019.

[64] K. Ejjabraoui. « Contribution à la conception de systèmes mécatroniques automobiles : méthodologie de prédimensionnement multi-niveau multi-physique de convertisseurs de puissance ». Thèse de doctorat. France : Université Paris-Sud 11, 2010.

[65] M. Bendali. « Conception multi-niveau multi-physique de systèmes mécatroniques automobiles : prise en compte de la contrainte de fiabilité de convertisseurs de puissance embarqués dans un véhicule hybride/électrique ». École doctorale STITS ; thèse effectuée à l'ESTACA'Lab (ESTACA). NNT : 2014PA112345. Thèse de doctorat. Université Paris-Sud — Paris XI, 9 déc. 2014.

[66] S. Ramamurthi et P. Ramasamy. « Reliability evaluation of non-isolated high gain interleaved DC–DC converter ». In : *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 13.2 (2024), p. 794-799.

[67] A. A. Shalbaf, N. Shahidi et M. Hemati. « A high-gain interleaved DC–DC converter with reduced components for EV charging application ». In : *Computers & Electrical Engineering* 118 (2024), p. 109316.

[68] R. Rashid. « Quasi-Z-source interleaved DC–DC converter for fuel cell vehicle application ». In : *IET Power Electronics* (2024).

[69] S. Buso et L. Rossetto. « Damping of Flying Capacitor Dynamics in Multi-Level Boost DC–DC Converters ». In : *Electronics* 13.24 (2024), p. 4883.

[70] Y. Huangfu, S. Zhuo, F. Chen, S. Pang, D. Zhao et F. Gao. « Robust Voltage Control of Floating Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Systems ». In : *IEEE Transactions on Industry Applications* 54.1 (2018), p. 665-674.

[71] E. Pahon et et al. « Impact of current ripples on the durability of proton exchange membrane fuel cells: dataset and analysis ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* (2022).

[72] M. Kabalo, D. Paire, B. Blunier, D. Bouquain, M. G. Simoes et A. Miraoui. « Experimental evaluation of four-phase floating interleaved boost converter design and control for fuel cell applications ». In : *IET Power Electronics* 6.2 (2013), p. 215-226.

[73] A. Tuluhong, Z. Xu, Q. Chang et T. Song. « Recent Developments in Bidirectional DC–DC Converter Topologies, Control Strategies, and Applications in Photovoltaic Power Generation Systems: A Comparative Review and Analysis ». In : *Electronics* 14.2 (2025), p. 389.

[74] M. Ceraolo et D. Poli. *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Elsevier, 2009.

[75] A. Sciarretta et L. Guzzella. « Control of Hybrid Electric Vehicles ». In : *IEEE Control Systems Magazine* 27.2 (2007), p. 60-70.

[76] A. Djerioui et al. « Energy management strategy of supercapacitor/fuel cell energy storage devices for vehicle applications ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 44.41 (2019), p. 23416-23428.

[77] G. Paganelli, Y. Guezennec et G. Rizzoni. « Optimizing control strategy for hybrid fuel cell vehicle ». In : *SAE Technical Paper* (2002).

[78] N. Kim, A. R. Girard, T. Hendricks et H. Peng. « Adaptation of energy management strategy for PHEVs using learning based prediction of driving conditions ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61.6 (2012), p. 2405-2413.

[79] H. Lee et S. W. Cha. « Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Vehicles Using Model-Based Reinforcement Learning with Data-Driven Model Update ». In : *IEEE Access* 9 (2021), p. 59244-59254.

[80] P. Pisu et G. Rizzoni. « A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles ». In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 15.3 (2007), p. 506-518.

[81] N. Schouten, M. Salman et N. Kheir. « Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic ». In : *Control Engineering Practice* 11.2 (2003), p. 171-177.

[82] L. Guzzella et A. Sciarretta. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. Springer, 2007.

[83] A. Brahma, Y. Guezennec et G. Rizzoni. « Optimal energy management in series hybrid electric vehicles ». In : *Proceedings of the American Control Conference*. 2000, p. 60-64.

[84] C. C. Chan. « The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles ». In : *Proceedings of the IEEE* 95.4 (2007), p. 704-718.

[85] A. Panday et H. O. Bansal. « A review of optimal energy management strategies for hybrid electric vehicle ». In : *International Journal of Vehicular Technology* 2014.1 (2014), p. 160510.

[86] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay et A. Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press, 2004.

[87] N. Xu et al. « Towards a smarter energy management system for hybrid vehicles: A comprehensive review of control strategies ». In : *Applied Sciences* 9.10 (2019), p. 2026.

[88] T. Hofman et M. Steinbuch. « Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles ». In : *International Journal of Automotive Technology* 8.2 (2007), p. 133-140.

[89] H. Banvait, S. Anwar et Y. Chen. « A rule-based energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) ». In : *2009 American Control Conference*. IEEE. 2009, p. 3938-3943.

[90] N. BARHOUMI, H. Marzougui, F. Bacha et M. Boukhnifer. « Energy Management Algorithm of Fuel Cell/Supercapacitor System for Electrical Vehicle ». In : *2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. Istanbul, Turkey : IEEE, 17-20 mai 2022, p. 1415-1420.

[91] F. Sorrentino et M. Porfiri. « Analysis of parameter mismatches in the master stability function for network synchronization ». In : *Europhysics Letters* 93.5 (2011), p. 50002.

[92] A. Sciarretta et al. « A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle ». In : *Control Engineering Practice* 29 (2014), p. 287-298.

[93] G. Feng, Z. Feng, P. Sun, L. Guo et Z. Chen. « A Overview of Energy Management Strategies for Hybrid Power Systems ». In : *Energies* 18.17 (2025), p. 4769.

[94] A. Sciarretta, M. Back et L. Guzzella. « Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles ». In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12.3 (2004), p. 352-363.

[95] L. Serrao, S. Onori et G. Rizzoni. « A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 133.3 (2011), p. 031012.

[96] J. Zhou, R. Yang et X. Ma. « Development of fuzzy logic-based energy management strategy for a hybrid electric vehicle ». In : *Applied Energy* 149 (2015), p. 49-60.

[97] J. Wei, H. Yu et Y. Liu. « Deep reinforcement learning-based online energy management for plug-in hybrid electric vehicles to minimize fuel consumption and battery degradation ». In : *Applied Energy* 261 (2020), p. 114360.

[98] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, X. Han et M. Ouyang. « Multi-agent-based control for the energy management of hybrid electric vehicles ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66.12 (2017), p. 11032-11045.

[99] S. O. Showers et A. K. Raji. « State-of-the-Art Review of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Energy Management Systems ». In : *AIMS Energy* 10.3 (2022), p. 458-485.

[100] D. G. Luenberger. « Observers for Multivariable Systems ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 11.2 (1966), p. 190-197.

[101] R. E. Kalman. « A new approach to linear filtering and prediction problems ». In : *Journal of Basic Engineering* 82.1 (1960), p. 35-45.

[102] J. J. Slotine et W. Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall, 1991.

[103] G. Besançon. « An Overview on Observer Tools for Nonlinear Systems ». In : *Nonlinear Observers and Applications*. Sous la dir. de G. Besançon. T. 363. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007, p. 1-33.

[104] T. Kailath. *Linear Systems*. Prentice Hall, 1980.

[105] K. Ogata. *Modern Control Engineering*. 5th. Prentice Hall, 2010.

[106] B. D. O. Anderson et J. B. Moore. *Optimal Filtering*. Prentice-Hall, 1979.

[107] D. Simon. *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*. Wiley-Interscience, 2006.

[108] R. Hermann et A. Krener. « Nonlinear controllability and observability ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 22.5 (1977), p. 728-740.

[109] S. J. Julier et J. K. Uhlmann. « Unscented filtering and nonlinear estimation ». In : *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004), p. 401-422.

[110] G. Bartolini, L. Fridman, A. Pisano et E. Usai, éd. *Modern Sliding Mode Control Theory: New Perspectives and Applications*. T. 375. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009.

[111] Y. Chitour, H. Obeid, S. Laghrouche, L. Fridman et A. Levant. « Barrier Function-Based Adaptive Continuous Higher-Order Sliding Mode Controllers with Unbounded Perturbations ». In : *arXiv preprint arXiv:2206.10904* (2022).

[112] Q. Zhao, Y. Zhang et Z. Chen. « Review of voltage-related anomalies in lithium-ion batteries: Diagnosis and mitigation ». In : *Journal of Power Sources* 560 (2023), p. 232521.

[113] M. Farza, M. M'Saad, T. Maatoug et M. Kamoun. « Adaptive Observers for Nonlinearly Parameterized Class of Nonlinear Systems ». In : *Automatica* 45.10 (2009), p. 2292-2299.

[114] X. Wang et J. Ma. « A survey on nonlinear state and parameter estimation using observers and filters ». In : *Sensors* 19.16 (2019), p. 3679.

[115] L. Chen, S. K. Spurgeon et C. Edwards. « Sliding Mode Observers for a Class of Linear Parameter Varying Systems ». In : *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 30.18 (2020), p. 8342-8362.

[116] C. Edwards et S. Spurgeon. *Sliding mode control: theory and applications*. CRC press, 1998.

[117] H. K. Khalil. *Nonlinear Systems*. 3rd. Prentice Hall, 2002.

[118] M. Farid et S. Rahmani. « Battery health management in hybrid systems: challenges and recent advances ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 169 (2023), p. 113027.

[119] N. Barhoumi, H. Marzougui, M. Boukhnifer et F. Bacha. « Four-leg floating interleaved converters for electric vehicle applications with rule-based energy management algorithm ». In : *Transactions of the Institute of Measurement and Control* (2024). OnlineFirst / Early Access.

[120] V. I. Utkin. *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer-Verlag, 1992.

[121] S. K. Spurgeon, C. Edwards et S. K. Spurgeon. « Sliding Mode Observers: A Survey ». In : *International Journal of Systems Science* 39.8 (2008), p. 751-764.

[122] W. Waag, S. Käbitz et D. U. Sauer. « Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles ». In : *Journal of Power Sources* 258 (2014), p. 321-339.

[123] X. Yang, Y. Liu, Y. Wang et C.-Y. Wang. « Understanding degradation mechanisms in lithium-ion batteries: Recent progress and perspectives ». In : *Nano Energy* 83 (2021), p. 105861.

[124] H. Wang, X. Shen, K. Liu et Y. Cui. « Suppressing dendrite growth in lithium metal batteries: Strategies and mechanisms ». In : *Advanced Materials* 34.12 (2022), p. 2102360.

[125] H. Jin, Z. Sun, Y. Zhang et X. He. « Detection and modeling of internal short circuits in lithium-ion batteries: Recent advances ». In : *eTransportation* 17 (2023), p. 100182.

[126] M. Tang et al. « Thermal safety of lithium-ion batteries under mechanical abuse ». In : *Journal of Energy Storage* 63 (2023), p. 107070.

[127] D. Lee, Y. Cho et S. Kim. « Interconnection defects in battery packs: Impact on thermal behavior and performance ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 70.3 (2023), p. 2154-2162.

[128] P. W. J. Liu et Z. Tang. « AI-Driven Fault Detection in Lithium-Ion Batteries Using Deep Learning Techniques ». In : *Energy AI* 5 (2023), p. 102045.

[129] J. Meng. « Battery fault diagnosis and energy management for embedded applications ». École doctorale n° 575, Electrical, Optical, Bio: Physics and Engineering (EOBE). Thèse de doct. Saint-Quentin-en-Yvelines, France : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, sept. 2020.

[130] J. Meng, M. Boukhnifer, C. Delpha et D. Diallo. « Incipient short-circuit fault diagnosis of lithium-ion batteries ». In : *Journal of Energy Storage* 32 (2020), p. 101658.

[131] A. Khalatbarisoltani, H. Zhou, X. Tang, M. Kandidayeni, L. Boulon et X. Hu. « Energy management strategies for fuel cell vehicles: A comprehensive review of the latest progress in modeling, strategies, and future prospects ». In : *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 25.1 (2023), p. 14-32.

[132] X. Wang et J. Hao. « Recent advances in ionic liquid-based electrochemical biosensors ». In : *Science bulletin* 61.16 (2016), p. 1281-1295.

[133] Y. Xia. « Comparison and analysis of SOC estimation based on first-order and second-order Thevenin battery models based on EKF ». In : *Academic Journal of Science and Technology* 6.3 (2023), p. 10-18.

[134] J. Wang, B. Wang, L. Zhang, J. Wang, N. Shchurov et B. Malozyomov. « Review of bidirectional DC–DC converter topologies for hybrid energy storage system of new energy vehicles ». In : *Green Energy and Intelligent Transportation* 1.2 (2022), p. 100010.

[135] A. S. Abdelaal, S. Mukhopadhyay et H. Rehman. « Battery energy management techniques for an electric vehicle traction system ». In : *IEEE Access* 10 (2022), p. 84015-84037.

[136] Z. Song, Y. Pan, H. Chen et T. Zhang. « Effects of temperature on the performance of fuel cell hybrid electric vehicles: A review ». In : *Applied Energy* 302 (2021), p. 117572.

[137] M. Khorshidian et M. Sedighi. « A review of the main mechanisms of catalyst layer degradation in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) and different performance recovery methods ». In : *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage* 6.2 (2019), p. 91-115.

[138] G. Kaur. « Cell voltages, polarisations and performances ». In : *Solid Oxide Fuel Cell Components: Interfacial Compatibility of SOFC Glass Seals*. Springer, 2015, p. 43-78.

[139] A. Husar, S. Strahl et J. Riera. « Experimental characterization methodology for the identification of voltage losses of PEMFC: Applied to an open cathode stack ». In : *International journal of hydrogen energy* 37.8 (2012), p. 7309-7315.

[140] F. Barbir. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Elsevier Academic Press, 2005.

[141] Q. Yan, H. Toghiani et H. Causey. « Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes ». In : *Journal of Power Sources* 161.1 (2006), p. 492-502.

[142] X. Li et H. Sabir. « Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 30.4 (2007), p. 359-371.

[143] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou et H. Peng. « Control of fuel cell power systems: Principles, modeling, analysis and feedback design ». In : *Springer* (2004).

[144] J. M. Correa, F. A. Farret, L. N. Canha et M. G. Simoes. « An electrochemical-based fuel cell model suitable for electrical engineering automation approach ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51.5 (2004), p. 1103-1112.

[145] N. Barhoumi, H. Marzougui, S. Farhani et F. Bacha. « Modelling and Control of Floating Interleaved Boost Converter for Electric Vehicle ». In : *2019 IEEE International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*. Hammamet, Tunisia : IEEE, 16-18 déc. 2019, p. 314-319.

[146] Ģ. Staņa, J. Voitkāns et K. Kroičs. « Supercapacitor Constant-Current and Constant-Power Charging and Discharging Comparison under Equal Boundary Conditions for DC Microgrid Application ». In : *Energies* 16.10 (2023), p. 4167.

[147] R. A. Dougal, S. Liu et R. White. « Power and life extension of battery–supercapacitor hybrids ». In : *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 25.1 (2002), p. 120-131.

[148] L. Zubieta et R. Bonert. « Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications ». In : *IEEE Transactions on Industry Applications* 36.1 (2000), p. 199-205.

[149] A. Millner. « Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles ». In : *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply* (2010), p. 349-356.

[150] R. Faranda, M. Gallina et D. Son. « A new simplified model of double-layer capacitors ». In : *2007 International Conference on Clean Electrical Power*. IEEE. 2007, p. 706-710.

[151] W. Andari, S. Ghozzi, H. Allagui et A. Mami. « Design, modeling and energy management of a PEM fuel cell/supercapacitor hybrid vehicle ». In : *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 8.1 (2017).

[152] D. Slaifstein, F. M. Ibanez et K. Siwek. « Supercapacitor modeling: A system identification approach ». In : *IEEE Transactions on Energy Conversion* 38.1 (2022), p. 192-202.

[153] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun et D. G. Dorrell. « A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018), p. 1868-1878.

[154] Y. Chen, L. Zhao et K. Lin. « Fast and accurate battery modeling for real-time hybrid electric vehicle simulation ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2024). Early Access.

[155] M. Ali, T. Qureshi et S. Hussain. « A review of interleaved DC–DC converters for energy storage and automotive applications ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 174 (2023). Impact Factor: 16.799, p. 113151.

[156] D. Guilbert, A. Mohammadi, A. Gaillard et A. Djerdir. « Reliability improvement of a floating interleaved DC/DC boost converter in a PV/fuel cell stand-alone power supply ». In : *Electric Power Components and Systems* 47.16-17 (2019), p. 1510-1523.

[157] Q. Li, Y. Huangfu, J. Zhao, S. Zhuo et F. Chen. « Controller Design and Fault Tolerance Analysis of 4-Phase Floating Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Electric Vehicles ». In : *IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Beijing, China, 2017, p. 7753-7758.

[158] Y. Tang, P. C. Loh et P. Wang. « Multiphase Interleaved Converters: Analysis, Design, and Application ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.6 (2008), p. 1976-1985.

[159] P. Delarue, C. Marchand et A. Venaille. « Design and Control of Interleaved DC-DC Converters for Embedded Applications ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.10 (2018), p. 8611-8620.

[160] Q. Li, S. Pang et M. G. Simões. « Current Sharing Control for Interleaved DC–DC Converters in Fuel Cell Applications ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 36.7 (juill. 2021), p. 7563-7574.

[161] D. Guilbert. « Tolérance aux défauts et optimisation des convertisseurs DC/DC pour véhicules électriques à pile à combustible ». Thèse de doctorat en Génie Électrique, NNT: 2014BELF0245. Thèse de doct. Belfort–Montbéliard, France : Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), déc. 2014.

[162] N. Barhoumi, H. Marzougui et F. Bacha. « Improved Current Control of Floating Interleaved Boost Converter Dedicated to Vehicular Applications ». In : *2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*. Hammamet, Tunisia : IEEE, 20-22 déc. 2021.

[163] C. Li, Y. Liu et Y. Wang. « Rule-based energy management strategy for hybrid electric vehicles: Review and recent advances ». In : *Applied Energy* 286 (2021), p. 116485.

[164] S. Pang, Q. Xu, J. Yang, X. Li, Z. Wang et X. Zhao. « Control strategy for interleaved bidirectional DC–DC converters in hybrid energy storage systems ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 34.1 (2019), p. 1013-1027.

[165] S. Pang, Q. Li et M. G. Simões. « Control-Oriented Modeling of Multiphase Interleaved Boost Converters ». In : *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 7.3 (2019), p. 2104-2114.

[166] T. Mesbahi. « Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multiphysique ». Thèse de doct. France : École Centrale de Lille, 2016.

[167] J. Ji, X. Wang, Y. Wang et H. Wang. « An Experimental and Simulation Study on Optimisation of a Hybrid Energy Storage System ». In : *Energies* 12.6 (2019). Supercondensateur 12 V 300 F, p. 1091.

[168] J. Bernard, N. Y. A. Shammas, D. J. Morrow et D. J. Irwin. « Fuel efficient power management strategy for fuel cell hybrid vehicles ». In : *Control Engineering Practice* 18.4 (2010). Batterie 12 V / 18 Ah, p. 408-417.

[169] Z. Zhang et M. A. E. Andersen. *A Two-Stage DC-DC Converter for the Fuel Cell-Supercapacitor Hybrid System*. Rapp. tech. Deux phases; C_out = 470 µF/350 V; fs = 20 kHz. Technical University of Denmark, 2009.

[170] D. Guilbert, A. Djerdir et A. Miraoui. « Investigation of interactions between PEM fuel cell and interleaved multi-phase DC/DC converters ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 40.36 (2015), p. 11824-11835.

[171] W. Subsingha et P. Sarakarn. « 4 Phase Interleaved DC Boost Converter for PEMFC Applications ». In : *Proc. Int. Conf. on Advances in Engineering*. Power rating ~1.2 kW; 4-phase; fs ~25 kHz. 2012.

[172] J. E. Tate et S. P. Boyd. « Finding consistent driving cycles ». In : *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2008, p. 988-993.

[173] L. F. M. Silva, J. A. Ferreira et P. F. Ribeiro. « Hardware-in-the-loop simulation for power electronics and electrical drives—A review ». In : *Electric Power Systems Research* 182 (2020), p. 106224.

[174] Y. Zhang, Y. Yang et F. Blaabjerg. « Hardware-in-the-Loop Simulation—A Survey and Perspective of Power Electronics Progress ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 35.6 (2020), p. 5944-5964.

[175] UNECE. *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)*. [Online]. Available: `https://unece.org/transport/vehicle-regulations`. 2015.

[176] United States Environmental Protection Agency (EPA). *Dynamometer Drive Schedules*. [Online]. Available: `https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules`. 2018.

[177] B. Bendjedia, N. Rizoug, M. Boukhnifer et F. Bouchafaa. « Hybrid fuel cell/-battery source sizing and energy management for automotive applications ». In : *IFAC-PapersOnLine* 50 (2017), p. 4745-4750.

[178] N. Barhoumi, M. Boukhnifer et F. Bacha. « Resilient Energy Management Architecture of Hybrid Fuel Cell/Battery System ». In : *2025 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET 2025)*. Accepted/To appear; DOI non encore disponible au moment de la vérification. Hammamet, Tunisia : IEEE, 1er-4 mai 2025.

[179] T. Azib, C. Larouci, A. Chaibet et M. Boukhnifer. « Online Energy Management Strategy of a Hybrid Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Vehicular Power System ». In : *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 9.5 (2014), p. 548-554.

[180] H. E. Ghadbane, S. Barkat, A. Houari, A. Djerioui, A. Hadjkaddour et T. Mesbahi. « A load following energy management strategy for a battery–supercapacitor hybrid power system implemented with a PIL co-simulation approach ». In : *Smart Grids and Sustainable Energy* 9.2 (2024), p. 32.

[181] T. Li, M. Guo et X. Han. « Parameter identification of second-order equivalent circuit model for lithium-ion battery using hybrid optimization ». In : *Journal of Energy Storage* 62 (2023), p. 106949.

[182] B.-H. Nguyen, T. Vo-Duy, M. C. Ta et J. P. F. Trovão. « Optimal energy management of hybrid storage systems using an alternative approach of Pontryagin's minimum principle ». In : *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 7.4 (2021), p. 2224-2237.

[183] P. Simon et Y. Gogotsi. « Materials for Electrochemical Capacitors ». In : *Nature Materials* 7.11 (2008), p. 845-854.

[184] N. Kumar, M. Shanmugam, R. Ghosh et al. « Recent Advanced Supercapacitor: A Review of Storage Mechanisms, Electrode Materials, Modification, and Perspectives ». In : *Nanomaterials* 12.20 (2022), p. 3708.

[185] J. T. Pukrushpan, A. Stefanopoulou et H. Peng. *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*. Advances in Industrial Control. London : Springer, 2004.

[186] J. T. Pukrushpan, A. Stefanopoulou et H. Peng. « Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 126.1 (2004), p. 14-25.

[187] G. Zhao, X. Wang et M. Negnevitsky. « Connecting Battery Technologies for Electric Vehicles from Battery Materials to Management ». In : *iScience* 25.2 (2022), p. 103744.

[188] S. Hajiaghasi, A. Salemnia et M. Hamzeh. « Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review ». In : *Journal of Energy Storage* 21 (2019), p. 543-570.

[189] X. Chen, M. Li et Z. Chen. « Meta rule-based energy management strategy for battery/supercapacitor hybrid electric vehicles ». In : *Energy* 285 (2023), p. 129365.

[190] A. M. Adeyinka, O. Olagoke, S. O. Oyedepo et al. « Advancements in hybrid energy storage systems for grid-connected applications: A comprehensive review ». In : *Sustainable Energy Research* 9.1 (2024), p. 29.

[191] J. Xing et P. Wu. « State of Charge Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Improved Adaptive Unscented Kalman Filter ». In : *Sustainability* 13.9 (2021), p. 5046.

[192] Y. Feng, C. Xue, Q.-L. Han, F. Han et J. Du. « Robust Estimation for State-of-Charge and State-of-Health of Lithium-Ion Batteries Using Integral-Type Terminal Sliding-Mode Observers ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.5 (2020), p. 4013-4023.

[193] Y. Chang, R. Li, H. Sun et X. Zhang. « Estimation of SOC in Lithium-Iron-Phosphate Batteries Using an Adaptive Sliding Mode Observer with Simplified Hysteresis Model during Electric Vehicle Duty Cycles ». In : *Batteries* 10.5 (2024), p. 154.

[194] Q. Chen, J. Jiang, H. Ruan et C. Zhang. « A New Double Sliding Mode Observer for EV Lithium Battery SOC Estimation ». In : *Mathematical Problems in Engineering* 2016 (2016), p. 1-9.

[195] L. He, G. Wang, B. Hu, X. Liu, J. Liu et M. Shi. « State-of-charge estimation by extended sliding mode observer based on lithium-ion battery voltage dynamics ». In : *Journal of Power Sources* 611 (2024), p. 234718.

[196] S. X. Ding. *Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008.

[197] T. Lan, S. Chen, W. Shen et al. « A Sensor-Fault-Estimation Method for Lithium-Ion Batteries: Models, Observers, and Experimental Validation ». In : *Sensors* 23.18 (2023), p. 7737.

[198] Y. Xu, X. Ge et W. Shen. « A Novel Set-Valued Sensor Fault Diagnosis Method for Lithium-Ion Battery Packs in Electric Vehicles ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 72.7 (2023), p. 8661-8671.

[199] M. Basseville et I. Nikiforov. *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, 1993.

[200] OPAL-RT Technologies. *Real-Time Simulation and HIL Testing for Power Electronics and Electric Vehicles*. [Online] Available: `https://www.opal-rt.com`. 2023.

[201] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. D. Vicuña et M. Castilla. « Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58.1 (2011), p. 158-172.

[202] O.-R. Technologies. *RT-LAB User Guide*. Disponible en ligne : `https://www.opal-rt.com`. 2024.

[203] Y. Tang, X. Zhang, J. Li et H. Wang. « A rule-based energy management strategy for fuel cell hybrid vehicles using adaptive power distribution ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 47.12 (2022), p. 7565-7577.

[204] J. M. Miller. « Battery electrochemistry and battery management in hybrid-electric vehicles ». In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 53.2 (2004), p. 409-420.

[205] E. Karden, D. Sauer, H. F. Garche et P. Jossen. « Requirements for future automotive batteries—A snapshot ». In : *Journal of Power Sources* 168.1 (2007), p. 2-11.

[206] A. Malmquist et al. « Energy management of a fuel cell/battery/supercapacitor system in a hybrid electric vehicle ». In : *Energies* 10.4 (2017), p. 549.

[207] P. Yu, M. Li, Y. Wang et Z. Chen. « Fuel cell hybrid electric vehicles: A review of topologies and energy management strategies ». In : *World Electric Vehicle Journal* 13.9 (2022), p. 172.

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans la dynamique de la transition énergétique, où l'électrification des transports et de la production d'énergie constitue un levier majeur pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et renforcer l'indépendance énergétique. Elle apporte une contribution originale à la gestion de l'énergie dans des systèmes hybrides multi-sources en se concentrant sur une architecture combinant une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), une batterie lithium-ion et une supercapacité, interfacées par des convertisseurs DC–DC entrelacés (bidirectionnels ou unidirectionnels) afin d'assurer la flexibilité et l'efficacité du transfert de puissance. L'approche proposée repose sur une stratégie de gestion déterministe qui assigne des rôles clairs à chaque source : la PEMFC opère autour de son point de rendement maximal pour couvrir la charge moyenne et préserver la durée de vie de l'empilement ; la batterie prend en charge les variations lentes ou prolongées de puissance ; la supercapacité traite les sollicitations rapides et la récupération d'énergie (démarrages, accélérations, freinage régénératif) grâce à sa faible constante de temps et à sa grande densité de puissance. Au-delà du pilotage énergétique, la fiabilité est adressée par la conception d'un observateur non linéaire en mode glissant d'ordre deux, destiné à estimer de façon robuste l'état de charge (SoC) de la batterie et à permettre un diagnostic intelligent incluant la détection des défaillances de capteurs et des défauts internes de type court-circuit. La validation s'appuie d'abord sur une modélisation multi-physique sous MATLAB/Simulink intégrant modèles dynamiques, gestion d'énergie et observateur, puis sur une expérimentation temps réel OPAL-RT (RT-LAB) en configuration *Hardware-in-the-Loop* (HIL), qui évalue avec précision l'efficacité de la stratégie et des boucles courant–tension et offre une visualisation fine, en temps réel, des interactions entre les sources (PEMFC, batterie, supercapacité) et les charges sous des profils représentatifs, notamment les cycles NEDC et WLTP.

Abstract

This dissertation advances the energy transition by improving energy management in multi–source hybrid systems, a key lever to cut greenhouse–gas emissions and bolster energy sovereignty. It focuses on a three–source architecture—PEMFC, lithium–ion battery, and supercapacitor—interfaced via interleaved DC–DC converters (bidirectional or unidirectional) to ensure flexible, efficient power transfer. The core contribution is a deterministic, rule–based energy management strategy that assigns clear roles to each source: the fuel cell operates near its maximum–efficiency region to supply the average load and preserve stack lifetime; the battery accommodates slower or sustained power deviations; and the supercapacitor handles fast dynamics (start–ups, accelerations, regenerative braking) thanks to its low time constant and high power density. Beyond power sharing, system reliability is addressed through a second–order sliding–mode observer that delivers robust, real–time estimation of battery state of charge (SoC) and enables intelligent fault diagnosis, targeting sensor anomalies and internal short–circuit events (including those triggered by dendrite growth or separator degradation). The approach is validated in two stages: a multi–physics MATLAB/Simulink model integrating component dynamics, the supervisory energy manager, and the observer; then a hardware–in–the–loop campaign on an OPAL–RT (RT–LAB) real–time platform. This setup provides precise, dynamic assessment of the energy management strategy and the current–voltage control loops, and offers fine, real–time insight into interactions among the PEMFC, battery, and supercapacitor under standard driving profiles (NEDC, WLTP).