



Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées

Amel Benmouna

► **To cite this version:**

Amel Benmouna. Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. Français. NNT : 2019UBFCA020 . tel-02876606

HAL Id: tel-02876606

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02876606>

Submitted on 21 Jun 2020

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

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

UBFC

UNIVERSITÉ
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ



utbm
université de technologie
Belfort-Montbéliard

THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

PREPAREE A L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD

Ecole doctorale n°xxxxx

Ecole Doctorale Sciences Pour L'ingénieur Et Microtechniques

Doctorat de spécialité : Génie électrique

Par

Amel Benmouna

Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées

Thèse présentée et soutenue à « Belfort », le « 09/12/2019 »

Composition du Jury :

Mr Emmanuel Godoy	Professeur des universités, Uni.Paris-Sud/centraleSuperlec	Rapporteur
Mr Hamid Gualous	Professeur des universités, Univ. Caen, France	Rapporteur
Mr Loïc Boulon	Professeur des universités, UQTR, CANADA	Examineur
Mr. Mohamed Becherif	HDR, UBFC, Belfort	Directeur de thèse
Mr. Daniel Depernet	HDR, UBFC, Belfort	Encadrement
Mr Frédéric Claude	Groupe Segula Technologies	Invité

Table des matières

1	Chapitre 1 : Introduction générale et contexte des travaux.....	11
1.1	Positionnement de la thèse et orientation des travaux.....	14
1.2	Motivation.....	15
1.3	Contribution scientifique.....	16
1.4	Organisation de la thèse.....	18
2	Chapitre 2 : Sources d'alimentation des véhicules électriques hybrides.....	21
2.1	Introduction.....	21
2.2	Piles à combustible.....	24
2.2.1	Différents types de piles à combustible	26
2.2.1.1	PàC à Membrane Echangeuse de Proton (PEMFC)	26
2.2.1.2	PàC au Méthanol Direct (DMFC)	26
2.2.1.3	PàC Alcalines (AFC)	26
2.2.1.4	PàC à acide phosphorique (PAFC)	27
2.2.1.5	PàC à carbonates fondu (MCFC).....	27
2.2.1.6	PàC à oxyde solide (SOFC)	27
2.2.2	<i>Principe de fonctionnement</i>	27
2.2.3	<i>Modélisation des piles à combustible</i>	30
2.2.4	<i>Simulation et validation expérimentale</i>	33
2.2.5	<i>Avantages et inconvénients</i>	37
2.3.	Sources de stockage d'énergie	37
2.3.1	<i>Batteries</i>	38
2.3.1.1	Principe de base des batteries	38
2.3.1.2	Modèle électrique des batteries "Modèle de Thévenin"	39
2.3.1.3	Paramètres de charge et de décharge	40
2.3.1.3.1	<i>Etat de charge des batteries</i>	40
2.3.1.3.2	<i>Profondeur de la décharge de la batterie</i>	41
2.3.1.4	Technologies des batteries utilisables en embarquées.....	41
2.3.1.4.1	Batterie à l'Acide-Plomb :.....	41
2.3.1.4.2	Batterie à base de Nickel-Cadmium (NiCd):.....	42
2.3.1.4.3	Batterie à base de Nickel-Metal Hydrure (Ni-MH):.....	42
2.3.1.4.4	Batterie à base de Lithium	43
2.3.2	<i>Supercondensateurs</i>	44
2.3.2.1	Principe de fonctionnement des SC	45
2.3.2.2	Modèle électrique du SC	46

2.4	Convertisseurs DC/DC	47
2.4.1	<i>Convertisseur boost à la sortie de la PàC</i>	47
2.4.2	<i>Convertisseur buck/boost pour le système de stockage</i>	48
2.1	Hybridation des sources	48
2.1.1	Principales configurations	50
2.1.1.1	1.3.1.1 Système de stockage d'énergie	50
2.1.1.1.1	Architecture des systèmes hybrides	50
2.2	Stratégies de gestion d'énergie.....	52
2.3	Conclusion	57
3	Chapitre 3 : Modélisation de structures hybrides	60
3.1	Introduction.....	60
3.2	Modélisation Piles à combustible + batteries	62
3.2.1	<i>Architecture avec deux convertisseurs</i>	63
3.2.2	<i>Equations du système</i>	64
3.2.2.1	Modélisation du convertisseur de la PàC.....	65
3.2.2.2	Modélisation du système globale.....	65
3.3	Modélisation PàC + SCs	66
3.3.1	<i>Equations du système</i>	67
3.3.1.1	Modélisation du convertisseur de la PàC.....	67
3.3.1.2	Modélisation du convertisseur élévateur/abaisseur du SC.....	67
3.3.1.3	Modélisation du système globale.....	67
3.4	Modélisation Piles à combustibles + batteries + SCs	68
3.4.1	<i>Système d'ordre 8 : Architecture avec trois convertisseurs</i>	68
3.4.1.1	Equations du système.....	69
3.4.1.1.1	<i>Modélisation du convertisseur élévateur de la PàC</i>	69
3.4.1.1.2	<i>Modélisation du convertisseur de la batterie</i>	69
3.4.1.1.3	<i>Modélisation du convertisseur du SC</i>	69
3.4.2	<i>Système d'ordre 6 : Architecture avec trois convertisseurs</i>	71
3.4.2.1	Equations du système.....	71
3.4.2.1.1	<i>Modélisation du convertisseur de la PàC</i>	71
3.4.2.1.2	<i>Modélisation du bus DC</i>	71
3.4.2.1.3	<i>Modélisation du convertisseur élévateur/abaisseur de la batterie</i>	71
3.4.2.1.4	<i>Modélisation du convertisseur élévateur/abaisseur du SC</i>	72
3.4.2.1.5	<i>Modélisation de la charge</i>	72
3.4.2.1.6	<i>Modélisation du système globale</i>	72
3.5	Conclusion	72

4	Chapitre 4 : Commande et gestion de l'énergie des systèmes hybrides pour les véhicules électriques	75
4.1	Contrôle basé sur la passivité.....	75
4.1.1	Preliminaires.....	75
4.1.1.1	Passivité et dissipativité	75
4.2	Représentation PCH	77
4.3	Commande d'IDA-PCH.....	80
4.3.1	Echange d'énergie, façonnage et dissipation de l'énergie	81
4.3.2	Approches du contrôle basées sur la passivité	82
4.3.3	<i>Commande IDA-PBC</i>	83
4.3.3.1	Propriétés de la stabilité des systèmes IDA-PBC.....	83
4.3.3.2	Propriété de stabilisation universelle d'IDA-PBC	84
4.3.4	Méthodologie de la méthode IDA-PBC :	84
4.4	<i>Gestion de l'énergie des sources hybrides par IDA-PBC</i>	87
4.4.1	<i>Source hybride PàC/Batterie</i>	87
4.4.1.1	Formulation du problème	87
4.4.1.2	Représentation PCH et loi de commande IDA-PBC.....	89
4.4.1.3	Résultats de simulation	91
4.4.1.4	Validation expérimentale	94
4.4.2	<i>Source hybride PàC/Supercondensateur</i>	100
4.4.2.1	Formulation du problème	100
4.4.2.2	Représentation PCH et loi de commande IDA-PBC.....	101
4.4.2.3	Résultats de simulation	103
4.4.2.4	Validation expérimentale	106
4.4.3	<i>Source hybride PàC/Batterie/Supercondensateur</i>	111
4.4.3.1	Deuxième structure PàC/batterie/SC : système d'ordre 6.....	112
4.4.3.1.1	Formulation du problème	112
4.4.3.2	Deuxième structure PàC/batterie/SC: en présence de défaut.....	114
4.4.3.2.1	Formulation du problème	114
4.4.3.2.2	<i>Représentation PCH et loi de commande IDA-PBC</i>	115
4.4.3.3	Résultats de simulation	117
4.4.3.4	Validation expérimentale	122
4.5	Conclusion	127
5	Chapitre 5 : Commande optimale HJB + IDA-PBC	129
5.1	Introduction.....	129
5.2	Etat de l'art sur le contrôle optimal	130

5.3	Principe de la méthode HJB.....	131
5.3.1	Formulation du problème	131
5.3.2	Intérêts de la combinaison <i>HJB + IDA-PBC</i>	134
5.4	HJB + IDA-PBC pour le système PàC/Batterie.....	134
5.4.1	Méthode HJB + IDA-PBC.....	134
5.4.2	Validation de la commande HJB + IDA-PBC.....	137
5.4.3	<i>HJB + IDA-PBC pour le système PàC/SC</i>	143
5.4.3.1	Méthode HJB + IDA-PBC.....	143
5.4.3.2	Validation de la commande HJB + IDA-PBC.....	144
5.4.4	HJB + IDA-PBC pour le système PàC/Batterie/SC	150
5.4.4.1	Méthode HJB + IDA-PBC.....	150
5.4.4.2	Validation de la commande HJB + IDA-PBC.....	153
5.5	Conclusion	157
6	Chapitre 6 : Conclusions et perspectives	159

Liste des figures

- Fig.1.1 (a) consommation du pétrole et (b) émission du CO₂ en 2010
- Fig.2.1. Evolution du marché des véhicules électriques à PàC dans le monde
- Fig.2.2 Diagramme de Ragone
- Fig.2.3. Réactions électrochimique reliées avec processus des piles à combustibles. (a) Electrolyse de l'eau. (b) production de l'électricité résultante de la recombinaison de l'H₂ et de l'O₂
- Fig. 2. 4. Principe de fonctionnement de la PàC
- Fig. 2.5. Architecture d'une cellule de la PàC
- Fig.2.6. Modèle dynamique de Larminie et Dicks de la PàC
- Fig.2. 7. Banc d'essai pour la caractérisation de la PàC
- Fig.2. 8. Tension, Courant et puissance de la PàC en fonction du temps
- Fig.2.9. Courbe de polarisation de la PàC
- Fig.2. 10. Courbe de polarisation de la PàC : expérimental et simulation
- Fig. 2.11. Caractéristique de la PàC courant, tension et puissance : expérimental
- Fig.2.12 Batterie au plomb acide
- Fig.2.13. Circuit électrique du Modèle Thévenin
- Fig.2.14. Composition interne d'un SC
- Fig.2.15. Circuit équivalent d'un SC
- Fig.2.16. Convertisseur Boost de la PàC
- Fig.2.17. Convertisseur Buck/Boost
- Fig.2.18 Illustration d'un partage des puissances pour une hybridation idéale
- Fig.2.17 flux de puissance dans une source hybride
- Fig.3.1 Architecture de la source hybride PàC/Batterie
- Fig. 3.2 Schémas équivalents du convertisseur de la PàC en mode de conduction continue
- Fig.3.3 Structure hybride PàC/SC
- Fig.3.4 Structure hybride PàC/Batterie/SC d'ordre 8
- Fig.3.5 Structure hybride PàC/Batterie/SC d'ordre 6
- Fig.4.1 interconnexion des systèmes passifs
- Fig.4.2. Interconnexion de rétroaction
- Fig.4.3 Structure globale de la commande IDA-PBC de la source hybride étudiée où la PàC/batterie
- Fig.4.4. Puissances des différentes sources de la structure hybride PàC/Batterie
- Fig.4.5. Résultats de la simulation : (haut) contrôle de la PàC, (milieu) contrôle de la batterie et (bas) variation de la résistance de la charge
- Fig.4.6. Comportement électrique de la PàC : la tension (haut) et le courant (bas)
- Fig.4.7 Comportement électrique de la batterie : la tension (haut) et le courant (bas)
- Fig.4.8. Tension de bus et sa consigne (haut), le courant de la charge (bas)
- Fig.4.9 convertisseur (gauche), pack de batteries (droite)
- Fig.4.10 source de puissance (gauche), charge (droite)
- Fig.4.11 Vu de l'ensemble du Banc d'essai d'hybridation PàC/Batterie réalisé à l'Université du Zhejiang
- Fig.4.12 Courant de la batterie et sa référence en considérant l'état de charge actuel de la batterie
- Fig.4.13. Résultat expérimental de la tension de la batterie
- Fig.4.14. Courant de la PàC
- Fig.4.15. Tension de la PàC
- Fig.4.16 Tension du bus et sa référence

- Fig.4.17. Résultats expérimentaux des puissances des sources utilisées (charge, PàC et la batterie).
- Fig.4.18. Organigramme du contrôle proposé pour la source hybride PàC/Batterie
- Fig.4.19 Structure globale IDA-PBC de la source hybride étudiée PàC/SC
- Fig.4.20 Résultats de simulation de l'évolution du temps de la tension de bus DC V_{DC} et sa référence V_d (Haut) et le courant de la charge i_L (bas).
- Fig.4.21 Comportement électrique de la PàC. (Haut) tension de la PàC, (bas) courant de la PàC.
- Fig.4.22 Comportement électrique du SC. (Haut) tension, (bas) courant
- Fig.4.23 Simulation de l'évolution des puissances PàC, SC et de la charge.
- Fig. 4.24. Véhicule hydrogène Némo
- Fig. 4.25 Profils de la vitesse et de la puissance du véhicule Némo
- Fig.4.26. Architecture du véhicule étudié PàC/SC (haut), Plateforme expérimentale (bas)
- Fig.4.27. (a) courant du SC et sa référence ; (b) zoom sur une partie de la courbe (a)
- Fig.4.28 Tension du SC (V_{sc}) et sa tension désirée V_{sc}^d
- Fig.4.29 Tension du bus V_{DC} et sa référence V_d (a), erreur de contrôle de la tension (b)
- Fig.4.30 les puissances de la source hybride PàC/SC et la charge
- Fig.4. 31 Courbe des puissances avec les phases de recharges des SC (puissance négative)
- Fig.4. 32 Puissances montrant le rôle complémentaire entre la PàC et le SC
- Fig.4.33 Résultats de simulation du courant de référence de la batterie et son SOC pour différents scénarios.
- Fig.4.34 Courant de la batterie et sa consigne pour différentes valeurs du SOC.
- Fig.4.35 Puissances des différentes sources de la structure PàC/Batterie/SC en considérant un défaut au niveau de la PàC à 25s et différentes valeurs du SOC initial de la batterie
- Fig.4. 36 Banc de test pour l'hybridation PàC/Batterie/SC
- Fig.4.37 (a) Tension du Bus V_{DC} et sa référence, (b) Erreur d'asservissement de la tension V_{DC}
- Fig.4.38 Expérimentation : (a) tension du SC et sa consigne. (b) courant du SC et sa référence
- Fig.4.39. Réponse électrique de la PàC : (a) courant de la PàC et consommation de H_2 , (b) tension de la PàC
- Fig.4.40 Expérimentation : (a) courant de la batterie et son SOC, (b) courant de la batterie et sa référence.
- Fig.4.41 Expérimentation : tension de la batterie
- Fig.4.42 Puissances des différentes sources de la structure PàC/Batterie/SC obtenues en expérimentation
- Fig.5.1 Principe du contrôle IDA-PBC+HJB pour le système PàC/Batterie
- Fig.5.2. Banc d'essai expérimental PàC/Batterie de l'université de Zhejiang en Chine
- Fig.5.3 représentations de la tension de la batterie
- Fig.5.4 résultat expérimental du courant de la batterie et sa référence
- Fig.5.5 courant de la PàC
- Fig.5.6 Tension de la PàC
- Fig.5.7 Tension du bus DC et sa référence (a) et le courant de la charge (b)
- Fig.5.8 Paramètres d'optimisation
- Fig.5.9 Puissances de la PàC, batterie et de la charge
- Fig. 5.10. Structure du contrôle choisi IDA-PBC+HJB pour la source PàC/SC
- Fig.5.11 Réponse électrique de la PàC : (a) Tension de la PàC, (b) Courant de la PàC.
- Fig.5.12 Courant de la PàC et le débit d'hydrogène

Fig.5.13 Courant du SC et sa référence

Fig.5.14 Tension du SC

Fig.5.15 Tension du SC et son SOC

Fig.5.16 courant de la charge (a), tension du bus DC et sa tension désirée (b)

Fig.5.17 Paramètres d'optimisation de la PàC et du SC

Fig.5.18 puissances de la PàC, SC et de la charge

Fig.5.19 Schéma du contrôle optimal proposé de la structure hybride PàC/Batterie/SC

Fig.5.20 Variables électriques de la batterie : courant et sa référence (a) tension (b)

Fig.5.21 Représentation du courant (a) et la tension de la PàC (b).

Fig.5.22 Représentation du courant de la PàC et consommation d'H2

Fig.5.23. Le courant du SC et sa référence (a) et la tension du SC (b)

Fig.5.24. Le courant et l'état de charge du SC

Fig.5.25 Evolution du courant de la charge (a) tension du bus et sa référence (b).

Fig.5.26 les puissances fournies par la PàC, la batterie et le SC selon la demande de la charge

Listes des tableaux

Tableau 1.1 : température de fonctionnement des différents types de PàC

Tableau 1.2 caractéristiques de la PàC utilisée

Tableau. 1.3 Avantages et inconvénients de la batterie Acide-Plomb

Tableau. 2.4 Avantages et inconvénients de la batterie Nickel-Cadmium

Tableau. 1.5 Avantages et inconvénients de la batterie Nickel-Metal Hydrure

Tableau. 1.6 Avantages et inconvénients de la batterie Lithium

Tableau. 1.7 caractéristique des Principes batteries

Table.4.1. Les principaux paramètres utilisés en simulation

Table.4.2. Principales caractéristiques d'une cellule de batterie utilisée

Tableau.4.3. Paramètres du SC utilisés dans la simulation

Tableau.4.5. Paramètres du véhicule étudié

Tableau.4.6. Energies et puissances des différentes sources utilisées

Acronymes

ICE	Internal Combustion Engine
VEH	Véhicule électrique hybride
VE	Véhicule Electrique
PàC	Pile à Combustible
SC	Supercondensateur
IDA-PBC	Interconnection and Damping assignment-Passivity Based Control
PCH	Port Controlled Hamiltonian
HJB	Hamilton Jacobi Bellman
PEMFC	Pile à combustible à membrane échangeuses de proton
SOC	Etat de charge
AFC	Piles à combustible alcalines
PAFC	Piles à combustible à acide phosphorique
MCFC	Piles à combustible à carbonate fondu
SOFC	Piles à combustible à oxyde solide
ECMS	Energy consumption menimisation strategy

Remerciement

je suis très heureuse de pouvoir exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de prêt et de loin à l'aboutissement de ce travail de doctorat.

J'aimerais exprimer ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse, Dr. HDR Mohamed Becherif de me donner l'opportunité de faire une thèse sous sa direction, de me guider, pour ses conseils et son encadrement constants tout au long de la thèse. J'aimerais remercier en particulier Mohamed d'être toujours présent pour répondre à mes questions et de me donner la chance d'effectuer des stages dans des laboratoires internationaux. Ce travail ne sera pas abouti sans mon directeur de thèse, Merci !!!

Je tiens à remercier mon co-directeur Dr. HDR Daniel Depernet pour ces précieux conseils et aussi pour les discussions partagées, les sages conseils et son expérience.

J'exprime ma profonde gratitude à Pr. Emmanuel Gaudoy pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury. Je tiens à remercier le professeur Emmanuel Gaudoy pour rapporter mon manuscrit de thèse et les commentaires constructifs ainsi que les remarques précieuses qui ont amélioré la qualité de mon mémoire.

Je tiens à remercier Pr Loïc Boulon et Pr Hamid Gualous d'examiner mon travail de doctorat, pour leur participation et leurs questions intéressantes lors de la soutenance de ma thèse.

Je remercie Pr Loïc Boulon de m'accueillir au sein de l'institut de recherche sur l'hydrogène et m'a donné un accès libre à l'IRH pour faire mes tests.

Merci à Mr Frédéric Claude pour m'avoir donné l'opportunité de travailler dans le cadre de ces projets autour de la pile à combustible.

Je tiens à remercier mon époux et ma belle-famille (Hadja-Yasmine-Wassimou-Karima) qui m'ont soutenu au long de mon parcours. Je remercie mes parents, mes sœurs (Dalel-Wassila et Zahia), mon frère (Hamouda), mes beaux-frères (Bachir-Houari-Belkheir), mes nièces (Salima-Salsabil-Thana_Jenna) et mes neveux (Iyad-Ibrahim-Noufel), et ma tante Salima qui m'ont cru en moi. Merci mon papa et ma maman d'être toujours à mes côtés même la distance qui nous sépare.

Et enfin, je tiens à remercier mes collègues du Labo pour avoir partagé tous ces grands moments à l'intérieur du laboratoire.

Je remercie de tout mon cœur mes parents et mon époux!

Chapitre 1 :
Introduction générale et contexte des travaux

1 Chapitre 1 : Introduction générale et contexte des travaux

En raison de l'augmentation de la température moyenne mondiale de la planète depuis le début de l'ère industrielle (1880-1899), les gaz à effet de serre créés par le secteur des transports accélèrent ce phénomène [1]. Les véhicules équipés de moteurs à combustion interne conventionnels (ICE) existent depuis plus d'un siècle. La demande de véhicules de transport personnel a augmenté de façon spectaculaire au cours de la dernière décennie¹ [1] et continuera de croître, en raison de l'augmentation de la population mondiale et de la croissance économique rapide des grands marchés émergents tels que la Chine et l'Inde. Cette tendance a contribué à la forte augmentation de la consommation de pétrole puisque le secteur des transports est responsable de la principale consommation de pétrole, comme l'illustre la Fig.1.1(a). Outre la dépendance au pétrole, il existe des préoccupations environnementales (à savoir, la pollution, le réchauffement de la planète, etc.) liées à l'utilisation croissante des véhicules de tourisme. Comme l'illustre la Fig.1.1(b), le secteur des transports a représenté environ un tiers des émissions totales de dioxyde de carbone dans le monde en 2010.

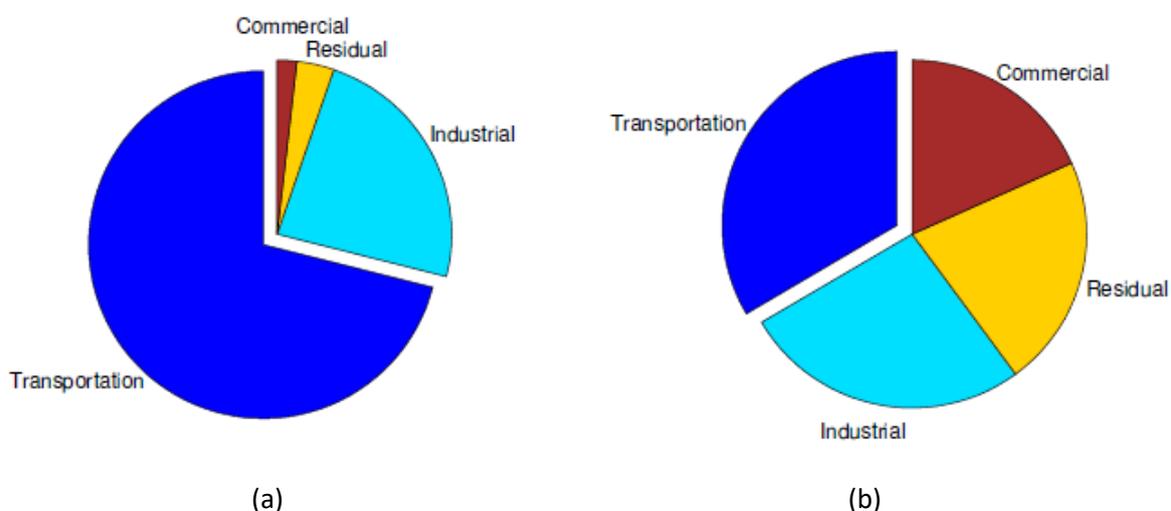


Fig.1.1 (a) consommation du pétrole et (b) émission du CO₂ en 2010 [2]

Les véhicules électriques alimentés par des batteries étaient l'une des solutions proposées pour faire face à la crise de l'énergie et au réchauffement de la planète. Cependant, le coût initial élevé, la faible autonomie et la longue durée de charge sont les principaux obstacles à la pénétration de ce type de VE dans le marché. Introduits commercialement à la fin des années 90, les véhicules électriques hybrides (VEH) ont été développés pour surmonter les inconvénients des véhicules à moteur à combustion interne (ICE) et des véhicules électriques à batterie. Le VEH utilise une ICE et un système

¹ Selon [1], 41,2 et 67,5 millions de voitures particulières ont été produites en 2000 et 2014, respectivement.

de stockage d'énergie, principalement une batterie, comme tampon d'énergie pour alimenter le véhicule. Avec cette solution, les émissions de gaz à effet de serre persistent toujours en raison de l'utilisation du ICE [3]. C'est la raison pour laquelle des moyens de transport plus propres doivent être proposés. Afin de lutter contre l'impact négatif des déplacements sur la qualité de l'air et le réchauffement climatique arrivent sur le marché de nombreux Véhicules Electriques (VEs). Grâce à leur nombreux points forts (tels que zéro particules fines, Silencieux, faible consommation d'énergie, etc.), les VE progressent rapidement dans nos centres-villes. Afin d'augmenter l'autonomie de ces véhicules non polluants, l'une des solutions consiste à utiliser des VE alimentés à l'hydrogène. Les VE à PàC sont des véhicules hybrides qui utilisent PàC au lieu de ICE. Les PàCs sont des convertisseurs d'énergie électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité tout en produisant de l'eau en tant que sous-produit. Par conséquent, ils ne produisent pas de polluants (c'est-à-dire, zéro émission). De plus, les PàC présentent un rendement supérieur à celui de l'ICE car elles n'impliquent pas d'énergie thermique comme étape intermédiaire de la conversion d'énergie électrochimique. L'avantage des piles à combustible est que l'énergie embarquée donc l'autonomie est bien plus grande et la recharge du véhicule ne demande que quelques minutes. La question qui se pose est comment produire de l'hydrogène ?

La première technique appelée reformage du Méthane consiste à extraire de l'hydrogène à partir du méthane [4]. Cette méthode aujourd'hui est la plus employée et permet déjà de réduire plus de 20% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à une flotte de véhicule classique [5]. Afin de rendre l'ensemble encore plus vertueux, le CO₂ émis lors du processus de reformage et de plus en plus souvent capturer puis réutiliser ce qui limite considérablement l'impact de la production en termes de gaz à effet de serre [6]. Une autre manière de produire l'hydrogène et de réaliser la même opération mais en prenant comme source du bio gaz, ceci permet de passer d'un gaz issu des énergies fossiles à un gaz issu de la décomposition des déchets [6]. L'électrolyse de l'eau est une autre manière de produire de l'hydrogène, en utilisant de l'électricité produite à partir des énergies renouvelables, cette technique permet d'extraire l'hydrogène à partir de l'eau. L'électrolyseur fonctionne comme une PàC mais dans l'autre sens, ainsi il sépare l'oxygène de l'hydrogène qui seront ensuite comprimés et stockés. L'un des atouts majeurs de l'hydrogène est de stocker durablement l'énergie produite et de la redistribuer quand nous en avons besoin. C'est l'ensemble de ces points forts qui font de l'hydrogène une solution incontournable pour mettre en marche la transition énergétique partout sur la planète.

En utilisant l'hydrogène, les véhicules à PàC sont une solution prometteuse pour réduire les gaz à effet de serre. Avec un réservoir d'H₂ embarqué (généralement 5,5 kg de H₂ pressurisé à 700 bar) [7], un conducteur peut s'attendre à parcourir environ 500 km, contre 200 km pour une voiture électrique à

batterie ordinaire (exemple : Nissan Leaf 2016) et 1000 km pour un véhicule thermique classique. De plus, le réservoir d'hydrogène se remplit en quelques minutes en station alors qu'une pleine charge régulière d'un VE à batterie dure plusieurs heures (en France, 350 bars est la pression d'hydrogène standard pour une voiture PàC) [7].

Même si les véhicules à PàC ne sont pas encore entrés dans la phase de commercialisation intensive, ils pourraient constituer l'étape finale de la transition du secteur des transports vers les véhicules respectueux de l'environnement. Cependant, pour en arriver à ce stade, la technologie de la PàC nécessite de relever de nombreux défis techniques, tels que la réduction du coût du système, l'amélioration de sa durabilité, son poids et son volume, ainsi que les défis associés à la production, à la livraison et au stockage de l'hydrogène [4].

Toutefois, les systèmes PàC offrent une dynamique limitée. Les transitoires de puissance rapides peuvent entraîner une panne d'alimentation en gaz, ce qui peut endommager la PàC de façon permanente [4]. De plus, le flux d'énergie des systèmes PàC est unidirectionnel, ce qui ne permet pas de récupérer l'énergie de freinage [5]. L'hybridation du PàC avec d'autres dispositifs de stockage d'énergie peut donc améliorer les performances du véhicule [6]. Une batterie peut être utilisée comme source secondaire pour gérer les transitoires de puissance, pour récupérer l'énergie de freinage, pour prolonger sa durée de vie et pour réduire son coût. Avec les voitures Mirai et Tucson, Toyota et Hyundai ont choisi cette technologie en utilisant respectivement des batteries Ni-Mh et Li-Poly [7]. L'hybridation d'une PàC avec des SuperCondensateurs (SC) en tant que tampon énergie/puissance représente une autre solution intéressante : avec sa puissance spécifique et sa densité de puissance élevées, les SCs peuvent facilement aider la PàC à répondre aux besoins en puissance élevés [5,8]. De plus, alors qu'on peut s'attendre à une durée de vie de 1000 cycles pour la batterie [9], les SCs peuvent durer de 500 000 à 1 000 000 de cycles [10]. En 2002, Honda a d'abord choisi cette technologie pour fournir de la puissance supplémentaire à son véhicule. En 2014, elle propose les véhicules électriques qui utilisent une configuration PàC/batterie. En effet, ces dernières années, les batteries ont fait des progrès significatifs. De plus, les batteries sont bien connues par les fabricants, car elles sont utilisées pour leurs modèles hybrides (par exemple, la Toyota Prius). Désormais, les applications industrielles profitent à la fois de la batterie et du SC pour assister les véhicules PàC. Selon les spécifications techniques et financières, des configurations directes ou indirectes des véhicules électriques hybrides sont possibles.

Dans ce travail de thèse, une configuration indirecte des sources est choisie. Les éléments du système de stockage sont SC et/ou batteries. L'utilisation des convertisseurs pour chaque source permet de gérer les sources selon une stratégie spécifique de gestion de l'énergie. Ceci peut être basé sur des

arguments de consommation de carburant ou de dégradation de la source principale. Le contrôle des véhicules à PàC utilisant les SC doit tenir compte des contraintes liées à cette association. Premièrement, ces sous-systèmes sont fortement couplés. Les deux sources sont en effet connectées par un bus DC. Par exemple, la PàC ou le SC ne peuvent pas répondre indépendamment aux besoins en énergie de traction et en flux de puissance. Pour cela, il est nécessaire de contrôler et de gérer l'interaction et le couplage entre les deux sources embarquées. Le problème de la gestion de l'énergie d'un système multi-sources, est de trouver la meilleure répartition de l'énergie entre les différentes sources d'énergie. Cette distribution doit satisfaire aux exigences de puissance de la charge et respecter les contraintes d'exploitation des sources, tels que la puissance aux bornes de la PàC, l'état de charge des supercondensateurs et les batteries.

Ce travail de thèse aborde la question du contrôle du flux d'énergie dans des systèmes composés de différentes unités (PàC/Batterie, PàC/SC, PàC/Batterie/SC). De plus, le principe de la stratégie de contrôle choisie est basé sur la régulation de la tension de bus DC du système hybride incluant plusieurs sources. Cette stratégie est réalisée par le contrôle non linéaire basé sur la passivité.

1.1 Positionnement de la thèse et orientation des travaux

Le sujet de thèse porte sur l'étude de la gestion énergétique reconfigurable d'un VE basée sur l'identification en ligne des sources embarquées. Ces dernières années, la gestion d'énergie d'un système hybride pour les applications automobiles a fait l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche. Dans ce travail de thèse, la chaîne énergétique considérée se constitue d'une PàC comme source primaire, de sources de stockage à savoir les batteries et/ou les SCs, de convertisseurs pour chaque source et enfin une charge émulant la demande en puissance. En effet, le problème qui se pose dans les systèmes hybrides est de trouver une stratégie permettant une meilleure répartition de la puissance électrique entre les différentes sources embarquées dans un VEH, ce qui est le but de ce travail de recherche. Ainsi que de définir des lois de gestion énergétique en considérant des mesures faites en temps réel dans le but d'augmenter la durée de vie et la fiabilité des sources d'une part, et la disponibilité du VE d'autre part. Dans ce travail de thèse, le contrôle non linéaire nommé IDA-PBC (Interconnection and Damping assignment-Passivity Based Control) est utilisé avec la structure PCH (Port Controlled Hamiltonian) qui permet de présenter des propriétés structurelles du système à savoir l'énergie totale du système, l'amortissement et les interconnexions d'états. La méthode IDA-PBC est une technique non linéaire puissante, elle est considérée comme un moyen général pour stabiliser une grande classe de systèmes physiques. Différentes structures du système hybride sont étudiées dans ce travail de thèse, à savoir, PàC/batterie, PàC/SC et PàC/Batterie/SC. Dans une seconde partie de ce travail de thèse, une nouvelle idée est proposée qui est basée sur la combinaison de deux différentes

stratégies qui sont l'IDA-PBC (présenté dans le chapitre 4) et le contrôle optimal basé sur la technique d'Hamilton Jacobi Bellman (HJB), dans le but d'une gestion d'énergie optimale d'un système hybride. La technique HJB permet de trouver la référence énergétique optimale à partager entre les sources en temps réel, en tenant compte des limitations des sources. Tandis que, la méthode IDA-PBC assure le contrôle et le suivi de l'énergie pour chaque source à leur référence tout en garantissant la stabilité de la fonction d'énergie globale (fonction de Lyapunov) où le minimum réside à l'équilibre souhaité.

Ce travail de thèse a été réalisé au sein de l'équipe de recherche SHARPAC (Systèmes Hybrides Actionneurs Pile A Combustible), département de recherche ENERGIE du laboratoire FEMTO-ST, à Belfort, France. L'objectif scientifique de l'équipe de recherche SHARPAC s'articule autour des approches systématiques des systèmes multiphysiques tels que les systèmes de piles à combustible ou les véhicules électriques hybrides. Le groupe se concentre sur l'idée de développer des approches de modélisation originales, des systèmes de diagnostic et de stratégies de gestion d'énergie des systèmes hybrides en temps réel. Le but de la recherche présentée dans cette thèse entre clairement dans les objectifs du groupe de recherche SHARPAC (Gestion d'énergie reconfigurable d'un véhicule électrique hybride basée sur l'identification des sources embarquées).

En effet, une partie du travail expérimental était effectuée au College of Control Science and Engineering, Zhejiang University (Hangzhou, Chine) et une autre partie expérimentale était réalisée à l'institut de recherche sur l'hydrogène à l'université Québec de Trois Rivières, Canada, sur des bancs d'essai d'un système hybride.

La recherche développée dans le cadre de cette étude s'inscrit clairement dans la continuité de l'axe de recherche et de développement réalisé au sein du département ENERGIE et au sein de la fédération de recherche FR FCLAB de ces dernières années. De l'étude de la structure de commande des systèmes à piles à combustible à l'optimisation des sources d'énergie utilisées dans les véhicules électriques.

1.2 Motivation

Le degré de liberté disponible dans les véhicules électriques hybrides à savoir la répartition de la puissance entre la source principale, le système de stockage et la charge, doit être judicieusement choisie pour obtenir de meilleures performances en termes de garantie de l'autonomie le long du trajet, l'économie de carburant possible avec la garantie de la durée de vie des sources embarquées. Dans la littérature, les stratégies qui contrôlent cette distribution d'énergie dans le groupe motopropulseur hybride sont souvent limitées en termes de validation pratique et de preuve de stabilité ainsi que d'intégration en temps réel. De plus, l'incorporation de différentes sources dans un système hybride impose l'utilisation des méthodes de contrôle puissantes et intelligentes car il s'agit de combiner différentes sources présentant des caractéristiques différentes en termes de technologie,

de dynamisme, etc., ce qui introduira des contraintes. C'est dans ce contexte que ce travail de thèse aborde la question de la maîtrise des flux d'énergie dans des sources hybrides composées de différentes unités. De plus, les principaux objectifs sont de déterminer des lois de commande qui permettent non seulement une distribution de puissance entre les sources et la charge mais aussi l'implémentation de ces lois de contrôle en temps réel avec une facilité de mise en œuvre et la garantie de la stabilité du système complet.

1.3 Contribution scientifique

Dans le cadre de cette thèse, un certain nombre de contributions à la littérature scientifique ont été publiées. Celles-ci sont énumérées ci-dessous.

Le premier article a été présenté à la conférence ICREGA'16 et il s'intitule : ***Fault Diagnosis Methods For Proton Exchange Membrane Fuel Cell System***. Cet article présente en première partie l'état de l'art des différents travaux récents sur les méthodes de diagnostic des défauts qui peuvent atteindre le système PàC. Par la suite, l'arbre de défaut est présenté, constituant plusieurs niveaux qui permettent de connaître le type et la source du défaut. Ensuite, les modèles de diagnostic ont été élaborés. Cet article est publié dans le journal IJHE [8] Le deuxième article qui s'intitule ***Novel energy management technique for hybrid electric vehicle via interconnection and damping assignment passivity-based control***, a été publié dans le journal Renewable energy [4]. Ce papier parle de la gestion d'énergie d'un système hybride en prenant en considération d'une part, le défaut au niveau de la PàC et d'autre part l'état de charge de la batterie afin de fournir la puissance demandée par la charge.

Le troisième et le quatrième article sont le fruit d'un séjour scientifique que j'ai effectué au College of Control Science and Engineering, Zhejiang University (Hangzhou, China) sur un banc d'essai de PàC/batteries/convertisseurs dans le but d'étudier la gestion d'énergie d'un système hybride multisources multiconvertisseurs. Initialement le banc comprenait uniquement la PàC, j'ai dû intégrer des batteries avec un convertisseur et contrôler l'ensemble par LabView. Chacune de ces sources est connectée au bus DC via un convertisseur élévateur unidirectionnel pour la PàC et un convertisseur élévateur/abaisseur bidirectionnel pour les batteries. Une stratégie de contrôle basée sur la passivité est choisie pour la gestion d'énergie du système étudié. Le troisième article est présenté dans une conférence internationale ISSH2'17 et qui s'intitule : ***"Interconnection And Damping Assignment Passivity Based Control For Fuel Cell And Battery Vehicle: Simulation And Experimentation"*** qui était publié dans le journal IJHE [9]. Le quatrième article dont le titre est ***"Combined passivity based control and optimal control for energy management of fuel cell/battery hybrid system"*** a été publié dans le journal "Asian Journal of Control" [10].

J'ai effectué un stage à l'institut de recherche sur l'hydrogène à l'université Québec de Trois Rivières, où un travail expérimental a été réalisé et qui porte sur la gestion de l'énergie utilisant le contrôle basé sur la passivité adoptée à un système multisources multiconvertisseurs, en particulier les systèmes hybrides PàC/SC et PàC/SC/Batterie. Dans les systèmes étudiés, la PàC représente la source principale et le SC est utilisé pour les transitoires de puissance où ils peuvent absorber ou fournir des pics de puissance alors que la batterie dans le système PàC/SC/Batterie peut être utilisée dans les phases de transition comme dans les régimes permanents et surtout en démarrage. La solution proposée est validée par des résultats expérimentaux. Il est à noter que le banc comprenait uniquement l'association PàC/SC, j'ai dû modifier le banc afin d'y intégrer des batteries avec leur convertisseur et l'implémenter dans LabView. Ce travail a été valorisé par la publication du cinquième article qui a été publié dans IJHE ("**Experimental Study of Energy Management of FC/SC Hybrid System Using The Passivity Based Control**") [11]. Par la suite, la limitation des sources en utilisant le contrôle optimal est prise en compte dans ce banc d'essai. Les résultats obtenus prouvent l'efficacité et la faisabilité de l'approche proposée pour un VE réel. Ce travail est valorisé par la publication d'un sixième article dans IJHE qui s'intitule "**Nonlinear control and optimization of hybrid electrical vehicle under sources limitation constraints**"[12]. Un septième article, où j'ai participé sur "**Cooperative Operation of Parallel Connected Boost Converters for Low Voltage-High Power Applications: An Experimental Approach**", qui a été publié [13].

1. Benmouna A, Becherif M, Depernet D, and Gustin F, "**Fault diagnosis methods for proton exchange membrane fuel**," Int. J. Hydrogen Energy, vol 42 (2017) 1534-1543.
2. Benmouna A, Becherif M, Depernet D, Ebrahim M. A. "**Novel energy management technique for hybrid electric vehicle via interconnection and damping assignment passivity-based control**", Renewable Energy 119 (2018),116-128.
3. Benmouna. A, Becherif. M, Chen. J, Chen, H, Depernet. D, "**Interconnection and damping assignment passivity-based control for fuel cell and battery vehicle: Simulation and experimentation**", International journal of hydrogen Energy, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.045>, In Press.
4. Benmouna. A, Becherif. M, "**Combined Passivity Based Control and Optimal Control for Energy Management of Fuel Cell/Battery Hybrid System**", Asian Journal of Control (In press)
5. Benmouna. A, Becherif. M, Dépature. C, Boulon. F, Gustin. G, Depernet. D. "**Experimental Study Of Energy Management Of FC/SC Hybrid System Using The Passivity Based Control**", Vol 43, Issue 25, 21 June 2018, Pages 11583-11592
6. Benmouna. A, Becherif. M, Depernet. D, Dépature. C, Boulon. L, "**Nonlinear control and optimization of hybrid electrical vehicle under sources limitation constraints**", International journal of hydrogen Energy, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.227>, In Press.

7. M Iqbal, A Benmouna, F Eltoumi, F Claude, M Becherif, HS Ramadan, **“Cooperative Operation of Parallel Connected Boost Converters for Low Voltage-High Power Applications: An Experimental Approach”**, Energy Procedia 162, 2019,349-358.

Articles conférences :

1. A. Benmouna, M. Becherif, L. Boulon, D. Depernet, **“Contrôle optimal de la source hybride basé sur la combinaison entre la PBC et HJB” cnriut2019 : Congrès National de la Recherche en IUT 2019**, 6-7 juin 2019 Toulon (France)
2. **“Interconnection And Damping Assignment Passivity Based Control For Fuel Cell And Battery Vehicle: Simulation And Experimentation”**, 14th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, 16-17 November 2017, Bucharest, Romania
3. **“Passivity based control and artificial neural networks management of hybrid full electrical car”**, 14th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, 16-17 November 2017, Bucharest, Romania.
4. **“Study of hybrid system composed of battery & Supercapacitor in subzero condition** 14th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, 16-17 November 2017, Bucharest, Romania.
5. Benmouna. A, Becherif. M, Chen. C, Eulerchen. H, Gustin. G, Depernet. D. **“Interconnection and damping assignment passivity based control for fuel cell and battery vehicle: simulation and experimentation”**, International Symposium on Sustainable Hydrogen (ISSH2’17), Alger, Algérie.
6. Benmouna A, Becherif M, Boulon L, Haddi A. **‘Using battery & Supercapacitor for electric cars start up’**, 4th International Conference on Automation, Control Engineering and Computer Science (ACECS), Maroc.
7. Benmouna A, Becherif M, Depernet D, Ebrahim M. A. **‘Novel energy management technique for hybrid electric vehicle via interconnection and damping assignment passivity based control’**, The 1st International Conference on Alternative Fuels: Future and Challenges (ICAF 2-4 December 2016, Turquie).
8. Benmouna A, Becherif M, Ebrahim M. A. **‘Energy management of hybrid vehicle of fuel cell, battery and supercapacity in the presence of fault’**, International Symposium on Sustainable Hydrogen (ISSH2’16 5-6 October 2016, Algerie)
9. Benmouna A, Becherif M, Depernet D, and Gustin F, **“Fault diagnosis methods for proton exchange membrane fuel,”** International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications, (ICREGA’16, 8-10 Février 2016, Belfort (France)

1.4 Organisation de la thèse

Ce travail de thèse porte sur la gestion d’énergie reconfigurable d’un VE hybride basée sur l’identification en ligne des sources embarquées. L’étude de la gestion d’énergie basée sur le contrôle de passivité est appliquée pour différentes configurations. Les lois de gestion d’énergie étaient validées en simulation et en pratique. Cette thèse est subdivisée en six chapitres, qui s’organisent de la manière suivante :

Le chapitre 1 présente l’introduction générale et le contexte scientifique. Le chapitre 2 est un chapitre introductif présentant dans un premier temps les différentes sources embarquées dans un VE à savoir leur principe de fonctionnement, les types ainsi que les avantages et inconvénients. Ce chapitre décrit aussi le sujet d’hybridation en termes de configuration, le choix du système de stockage ainsi que les

architectures possibles des sources hybrides. Dans la suite, un état de l'art sur les travaux précédents sur la gestion d'énergie des systèmes hybrides a été abordés.

Le chapitre 3 présente la modélisation des différentes structures hybrides étudiées dans ce travail de thèse. Les représentations mathématiques des sources hybrides sous forme d'équations d'état sont données. De plus, deux systèmes d'ordres différents ont été présentés pour la source hybride PàC/batterie/SC.

Cette thèse étant axée sur la stratégie de gestion d'énergie basée sur le contrôle non-linéaire par passivité, ceci est le but du chapitre 4 qui représente la partie centrale de cette thèse. Dans la première partie de ce chapitre, les préliminaires du contrôle basé sur la passivité sont présentés qui permettent de donner un aperçu sur la méthodologie de l'approche IDA-PBC. Dans une deuxième partie de ce chapitre, la méthode IDA-PBC est appliquée pour les différentes sources hybrides étudiées dans ce travail de thèse. Les résultats de la simulation ainsi que de la pratique pour les systèmes hybrides étudiés sont présentés. Pour les systèmes hybrides PàC/SC et PàC/batterie/SC, la méthode IDA-PBC a été validée sur un banc d'essai à échelle unitaire d'un VE de l'institut de Recherche sur l'Hydrogène de l'université d'UQTR, Canada.

Le chapitre 5 traite d'une nouvelle méthode de contrôle optimal basée sur la combinaison entre la méthode de IDA-PBC et HJB. Cette nouvelle technique est appliquée et validée expérimentalement pour les différentes structures hybrides étudiées dans le chapitre 4.

Le dernier chapitre résume le travail accompli en conclusion et les recherches futures proposées dans ce domaine.

Chapitre 2 :
Sources d'alimentation des véhicules électriques
hybrides

2 Sources d'alimentation des véhicules électriques hybrides

2.1 Introduction

Les véhicules à PàC utilisent des PàCs embarquées pour produire de l'électricité à partir d'hydrogène et d'air. Les PàC n'émettent que de la vapeur d'eau et ont le potentiel d'être très efficaces. L'électricité est soit utilisée pour faire fonctionner le véhicule, soit emmagasiner dans un dispositif de stockage d'énergie, tel qu'une batterie et/ou des SCs [14]. Les véhicules à PàC peuvent être considérés comme un type de VEH dans laquelle la PàC agit comme un générateur électrique qui utilise de l'hydrogène [15]. Ce type de véhicule pourrait être une solution à long terme ce que montre la Fig.2.1, puisque son développement n'a cessé de progresser.

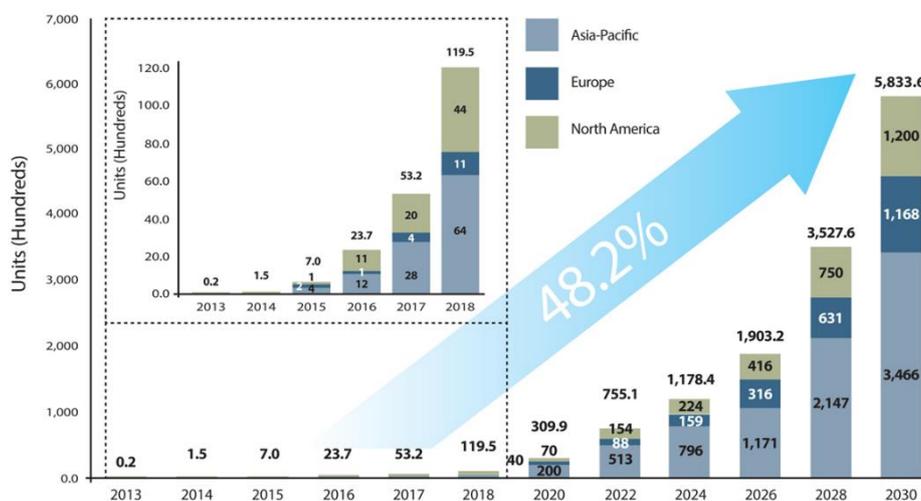


Fig.2.1. Evolution du marché des véhicules électriques à PàC dans le monde [16]

Le marché mondial des véhicules électriques à PàC est estimé à environ 583 360 unités en 2030. Les pays de l'Asie-Pacifique comme le Japon et la Corée du Sud dominant le marché avec 218 651 et 80 440 unités, respectivement. Les marchés des véhicules électriques à PàC en Europe et en Amérique du Nord devraient atteindre 117 000 et 118 847 unités respectivement d'ici 2030 [16]. Conformément à cette tendance, une vingtaine de lancements de voitures à PàC sont prévus sur les marchés mondiaux au cours des cinq prochaines années [16].

Bien que des prototypes aient déjà été proposés par les constructeurs, le potentiel des véhicules à PàC n'a pas encore été prouvé en termes de prix, d'approvisionnement en hydrogène et les problèmes de durée de vie, qui présentent des obstacles majeurs qui empêchent l'introduction commerciale à large échelle [4]. Malgré une énergie spécifique élevée, un point faible crucial des PàC est la dynamique lente des auxiliaires. Par conséquent, des sollicitations de charge rapides dans le cas de charges de forte puissance entraîneront de fortes chutes de tension [17]. C'est ce qu'on appelle le phénomène de starvation. Cette condition est évidemment dangereuse pour la PàC et peut provoquer des dommages

irréversibles [18]. Par conséquent, les applications des PàC dans le contexte des véhicules doivent inclure une source électrique auxiliaire capable d'améliorer le rendement du système en cas de demande d'énergie élevée pendant de courts intervalles de temps [19].

Ce chapitre est dédié dans un premier temps à la définition des différentes sources d'énergie et de puissance qui peuvent être embarquées dans un véhicule électrique hybride ainsi que leurs caractéristiques. Par la suite, les différents systèmes hybrides sont abordés. L'utilisation de ces sources dans un véhicule électrique nécessite le choix d'une gestion de distribution de la puissance entre les différentes sources afin de satisfaire la demande en énergie de la charge durant tout le parcours de conduite [20]. Pour cela, différents travaux récents sur la gestion d'énergie des systèmes hybrides à PàC sont cités.

De plus, les applications des véhicules électriques nécessitent une alimentation électrique avec une grande autonomie, une puissance de sortie élevée, une réponse dynamique rapide et pourquoi pas une récupération d'énergie et une recharge rapide [21]. Cependant, il n'est pas facile de trouver une seule source d'énergie qui répond à toutes ces exigences à un coût raisonnable. Les VEH combinent deux ou plusieurs sources d'énergie pour bénéficier de leurs différentes caractéristiques améliorant l'autonomie, la réversibilité et la réponse dynamique [22].

Les VEH peuvent être équipés d'une variété de sources d'énergie et de puissance telles que les systèmes PàCs, les batteries et les SCs [23]. Ces sources ont des caractéristiques et des fonctions différentes et sont classées en fonction de la façon dont elles obtiennent l'énergie électrique. Deux façons peuvent être distinguées :

- Sources d'énergie : prendre l'énergie chimique d'un carburant comme l'hydrogène (dans le cas des PàC) et la convertir en énergie électrique. Elles fournissent toute l'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule. Elles ne sont pas réversibles, c'est-à-dire qu'elles peuvent fournir de l'énergie électrique, mais elles ne peuvent pas la recevoir.
- Sources de stockage d'énergie : prendre l'énergie électrique des sources d'énergie et une fois chargées, elles fournissent de l'énergie au système. En général, l'énergie moyenne fournie par un système de stockage d'énergie tend vers zéro. Car on les sollicite lors des pics de puissance puis on les recharge par la suite.

Le diagramme de Ragone présenté dans la Fig.2.2 compare les sources d'énergie en ce qui concerne leur énergie spécifique (la capacité de fournir de l'énergie pour des périodes relativement longues) et la puissance spécifique (la capacité de fournir de grandes quantités d'énergie dans de courtes périodes de temps comme l'exige l'accélération) [24].

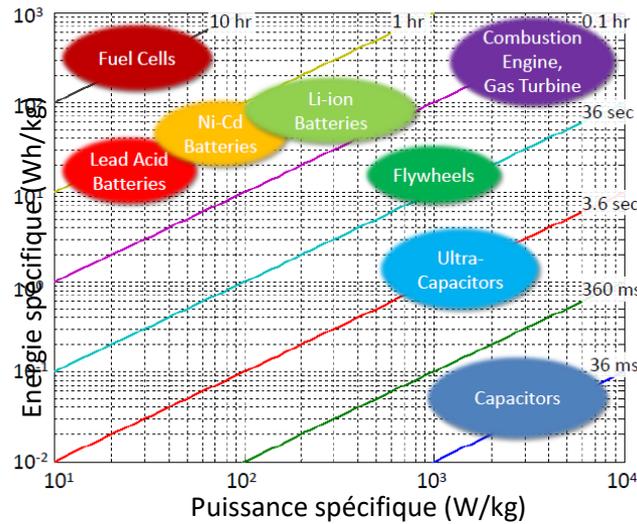


Fig.2.2 Diagramme de Ragone [24]

Le diagramme de Ragone montre les caractéristiques de la PàC, de la batterie et des SC en termes de densité de puissance et de densité d'énergie, ce qui permet un choix judicieux de la source à combiner avec la PàC. On peut déduire à partir de la

Fig.2.2 que la densité énergétique de la PàC associée à son réservoir d'hydrogène est très élevée, comparable à celle des réservoirs de carburant des véhicules thermiques actuels. La densité énergétique de la batterie est beaucoup plus faible que celle de la PàC. La densité d'énergie du SC est faible. Il peut à peine fournir de l'énergie durable. De plus, la haute densité énergétique d'hydrogène qui est trois fois plus élevée que celle du diesel, fait que le rendement de la PàC (50 à 60%) est nettement supérieur à celui du moteur à combustion interne (25%) [25][26]. Le SC a également une longue durée de vie car il peut être chargé et déchargé rapidement en envoyant et en recevant des électrons sans aucune consommation [24]. Tandis que la PàC présente certains inconvénients, comme le montre le diagramme de la

Fig.2.2, la densité de puissance de la PàC est très faible [26]. Lorsqu'il y a un besoin d'un transitoire de puissance élevée comme la phase d'accélération ou au démarrage, la PàC ne peut fournir une telle quantité de puissance [27]. Le SC possède en revanche une densité de puissance extrêmement élevée, il est donc capable de fournir de l'énergie impulsionnelle en peu de temps. La batterie a une densité de puissance supérieure à celle de la PàC mais inférieure à celle du SC. La PàC n'est pas réversible tandis que la batterie et le SC le sont. Lorsqu'ils sont embarqués avec la PàC, l'énergie cinétique ne sera pas perdue mais peut être transférée en énergie électrique et récupérée par le SC ou la batterie. Cela permettra d'économiser l'énergie et d'améliorer l'efficacité du système. Bien que la PàC présente de bonnes performances, cela n'est pas vérifié dans toute sa plage de fonctionnement du fait que lorsque sa densité de courant net est faible ou extrêmement élevée, l'efficacité du système de PàC est

faible. En effet, avec une faible densité du courant, le faible rendement est dû à la proportion importante de consommation de tous les autres auxiliaires qui doivent encore fonctionner même si la puissance de sortie est faible. Le rendement est faible à haute densité de courant en raison de la faible tension que la PàC peut générer et à la faible puissance de sortie. Par conséquent, la PàC ne peut atteindre un rendement élevé que dans une plage spécifique. Afin d'améliorer l'efficacité de l'ensemble du système, la PàC devra fonctionner dans sa plage de rendement élevée, alors que pour la plage de faible rendement, d'autres auxiliaires sont nécessaires pour aider la PàC à répondre aux exigences de la charge. Si le courant de la PàC doit changer en grande quantité dans un court laps de temps, la tension du stack chutera considérablement parce que l'action chimique ne peut se produire assez rapidement pour suivre le courant, ce qui provoque le phénomène de starvation. Les sources à réponse rapide lisseraient les performances de la PàC et éviteraient le manque de carburant (starvation).

2.2 Piles à combustible

Les piles à combustible sont des convertisseurs électrochimiques d'énergie. Elles peuvent être considérées comme des boîtes noires qui transforment directement l'énergie chimique contenue dans un combustible en énergie électrique tout en produisant de la chaleur et de l'eau comme sous-produits. Le mécanisme impliqué dans cette conversion est le même que celui des batteries. La principale différence est que la batterie contient les réactifs qui produisent de l'électricité, alors que ces réactifs doivent être fournis à l'extérieur de la PàC, c'est-à-dire qu'une batterie doit être jetée ou rechargée une fois que ces réactifs sont épuisés alors que la PàC peut être alimentée en hydrogène en faisant le plein du réservoir d'hydrogène. À cet égard, associés à un moteur électrique, ils sont comparables aux moteurs à combustion interne qui produisent de l'énergie mécanique, de la chaleur et des gaz d'échappement comme sous-produits. La première démonstration d'une PàC a été faite par William Grove en 1839 [28], à l'aide d'une expérience comme celle de la Fig.2.3. Le système de PàC est une source multiphysiques qui convertit l'hydrogène et l'oxygène en énergie électrique tout en produisant de la chaleur et de l'eau comme sous-produits, son processus inverse est l'électrolyse de l'eau. Avec le développement de la machine à vapeur et la découverte ultérieure du moteur à combustion interne, les piles à combustible n'ont connu aucun développement industriel avant le 20e siècle.

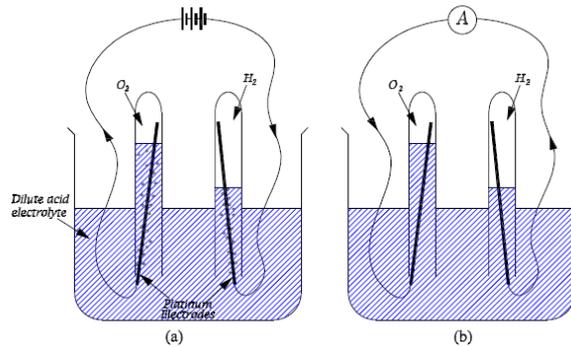
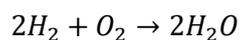


Fig.2.3. Réactions électrochimique reliées avec processus des piles à combustibles. (a) Electrolyse de l'eau. (b) production de l'électricité résultante de la recombinaison de l'H₂ et de l'O₂.

La réaction de base illustrée à la Fig.2.3. (a) montre comment l'eau est électrolysée en hydrogène et en oxygène en y faisant passer un courant électrique. Dans la Fig.2.3. (b), l'alimentation électrique a été remplacée par un ampèremètre qui mesure le flux de courant, l'électrolyse est inversée de sorte que l'hydrogène et l'oxygène se recombinent, et un courant électrique est produit. La réaction chimique qui régit le processus de la Fig.2.3 est décrite par :



Les premières applications dans les véhicules ont été réalisées par des démonstrateurs d'implantation à la fin des années 1950, à la suite des travaux de l'Université de Cambridge sur le fonctionnement de la PàC alcaline au-dessus de 200°C. En 1959, un système d'hydrogène/oxygène PàC alcaline de puissance de 6 KW a été développé et testé sur un chariot élévateur à fourche [28]. Au cours des dernières décennies, le prototype qui remplaçait une partie de la batterie par un groupe électrogène à PàC a poussé les recherches sur la technologie de pointe des véhicules à se tourner vers les véhicules à base de PàC.

Les principaux avantages de la PàC par rapport aux convertisseurs d'énergie traditionnels sont :

- Un rendement de conversion élevé. Une caractéristique très intéressante pour le secteur du transport est que le rendement augmente avec la diminution de la charge, contrairement au moteur à combustion interne où le rendement diminue dans ces conditions de la charge [29].
- Faibles émissions. La performance zéro émission est atteinte puisque le seul produit résultant de la réaction oxydoréduction est l'eau (au niveau de la PàC). Même si le gaz naturel ou le pétrole est utilisée comme un combustible pour l'obtention de l'hydrogène, les émissions du CO₂ restent plus faibles que celles du système conventionnel.
- Faible niveau du bruit. Le fonctionnement de la PàC est presque silencieux, la seule émission sonore sera produite par le compresseur à air du système PàC.

2.2.1 Différents types de piles à combustible

Différents types de PàC ont été développés. Ils sont généralement classés en fonction de leur température de fonctionnement ou du type d'électrolyte. Le Tableau 2.1 donne un aperçu des principales catégories de PàC, avec les combustibles, les températures de fonctionnement et les types d'électrolyte qui leur sont associés.

Tableau 2.1 : température de fonctionnement des différents types de PàC

Type de la PàC	Ion mobil	Température	Carburant
PEMFC	H^+	50 – 90°C	H_2
DMFC	H^+	50 – 90°C	CH_3OH
AFC	OH^-	60 – 250°C	H_2
PAFC	H^+	≈220°C	H_2
MCFC	CO_3^{2-}	≈650°C	H_2, CO, CH_4
SOFC	O^{2-}	750 – 1000°C	H_2, CO, CH_4

2.2.1.1 PàC à Membrane Echangeuse de Proton (PEMFC)

Les PEMFC sont basées sur un électrolyte polymère solide. Elles sont caractérisées par un temps de démarrage rapide, un fonctionnement à basse température et des densités de puissance élevées qui en font une technologie facile à utiliser, particulièrement pour les applications portables et de transport. Etant donné que la membrane polymère doit être maintenue bien humidifiée pour une bonne conduction des protons, la gestion de l'eau est l'un des points critiques pour une performance satisfaisante [30].

2.2.1.2 PàC au Méthanol Direct (DMFC)

Les DMFC sont similaires aux PEMFC. Comme le méthanol liquide peut être utilisé comme combustible, aucun traitement externe n'est nécessaire et de fortes densités de stockage d'énergie peuvent être atteintes. Un inconvénient important réside dans le fait que la membrane polymère n'est pas imperméable au méthanol liquide et que le filtre à carburant qui en résulte réduit l'efficacité globale du système.

2.2.1.3 PàC Alcalines (AFC)

Les AFC sont basées sur un électrolyte liquide KOH concentré. Les AFC peuvent fonctionner avec des catalyseurs à base de métaux non précieux et présentent donc un avantage de coût par rapport à d'autres types de PàC. L'utilisation d'un électrolyte liquide nécessite un système supplémentaire de recirculation de l'électrolyte. L'utilisation des AFC est limitée à des applications de niche telles que les applications militaires et spatiales.

2.2.1.4 PàC à acide phosphorique (PAFC)

Les PAFC sont basées sur un électrolyte acide liquide. En raison de leur température de fonctionnement plus élevée, elles sont moins sensibles aux impuretés de CO dans le carburant. Leur temps de démarrage relativement long et leur faible densité de puissance limite leur application aux centrales électriques fixes ou aux centrales de cogénération.

2.2.1.5 PàC à carbonates fondu (MCFC)

Les MCFC sont basées sur un électrolyte liquide à carbonates fondus et présentent généralement des rendements de conversion très élevés. Une température de fonctionnement élevée permet l'utilisation directe de catalyseurs non nobles ainsi que le traitement interne direct de combustibles tels que le gaz naturel. Les temps de démarrage relativement longs et les faibles densités de puissance limitent leur application aux centrales électriques fixes ou aux centrales de cogénération.

2.2.1.6 PàC à oxyde solide (SOFC)

Les SOFC sont basées sur l'électrolyte d'oxyde solide conduisant les ions d'oxygène O^{2-} . Comme les MCFC, la température de fonctionnement élevée se traduit par des catalyseurs non nobles, un traitement interne direct des combustibles hydrocarbonés et une chaleur résiduelle de haute qualité qui peut être utilisée dans les centrales électriques à cycle combiné. Cette technologie permet d'atteindre des densités de puissance élevées et des rendements élevés. Les temps de démarrage lents dictent leur utilisation principale comme centrales électriques fixes ou de cogénération.

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons aux PàC à membrane échangeuse de proton, dont les caractéristiques sont adaptées aux applications véhiculaires, telles que la basse température, l'électrolyte solide (adapter pour les secousses), le régime transitoire relativement rapide.

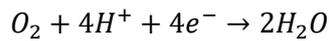
2.2.2 Principe de fonctionnement

Une PEMFC est une source électrochimique composée en un sandwich d'électrolyte entre deux électrodes. L'électrolyte a une propriété particulière qui permet aux ions positifs (protons) de passer tout en bloquant les électrons (Fig. 2.4). A la jonction de l'électrolyte et de chaque électrode, il existe une couche catalytique, généralement en platine. C'est là que l'action se déroule dans la cellule. À une extrémité, l'hydrogène se divise en protons et en électrons. Les électrons passent par un circuit externe à travers l'électrode électriquement conductrice vers un collecteur de courant, puis vers une charge externe. Les protons traversent l'électrode poreuse, se déplacent à travers l'électrolyte ioniquement conducteur vers l'autre interface catalyseur-électrolyte, où ils réagissent avec l'oxygène ainsi que les électrons. Cela produit de l'eau et de la chaleur comme sous-produit.

La réaction chimique qui régit le processus de la PàC au niveau de l'anode est la réaction d'oxydation de l'hydrogène qui permet de libérer des électrons et des protons, elle est décrite par :



Les protons se dirigent vers la cathode, à travers l'électrolyte tandis que les électrons circulent dans un circuit externe, créant ainsi de l'électricité. Les protons d'hydrogène et les électrons s'associent avec l'oxygène au niveau de la cathode produisant de l'eau, la réaction de réduction au niveau de la cathode est donnée par :



La réaction globale d'oxydoréduction de la PàC produit de l'eau, l'électricité et la chaleur. Elle est décrite par :

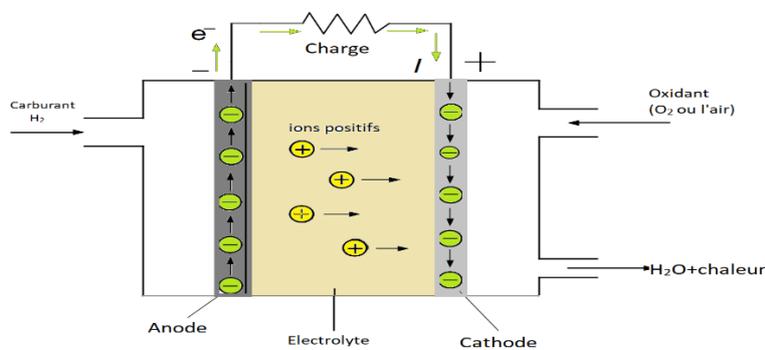
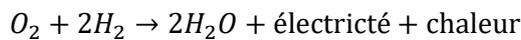


Fig. 2.4. Principe de fonctionnement de la PàC [31].

Chaque cellule produit une tension de sortie entre 0 à 1 V en fonction des conditions de fonctionnement de la PàC et de la charge électrique connectée, normalement, la tension produite est proche de 0.7V. Afin d'atteindre des valeurs de tension plus élevées, des cellules de PàC sont assemblées en série ce qui forme un stack de PàC. Par conséquent, la tension totale du stack est le nombre de cellules multiplié par la tension moyenne des cellules.

Une PEMFC est composée principalement de quatre éléments basiques [4], qui sont :

- Anode, l'électrode négative de la PàC, elle possède plusieurs rôles. Elle conduit les électrons libérés des molécules d'hydrogène afin qu'ils puissent être utilisés dans un circuit externe. Elle comporte des canaux gravés qui dispersent l'hydrogène gazeux de manière égale sur la surface du catalyseur.
- La cathode, le pôle positif de la PàC, comporte des canaux gravés qui distribuent l'oxygène à la surface du catalyseur. Elle renvoie également les électrons du circuit externe vers le catalyseur, où ils peuvent se recombiner avec les ions hydrogène et l'oxygène pour former de l'eau.

- L'électrolyte est la membrane échangeuse de protons. Ce matériau spécialement traité, ne conduit que les ions chargés positivement. La membrane bloque les électrons. Pour une PEMFC, la membrane doit être hydratée pour fonctionner et rester stable.
- Le catalyseur est un matériau spécial qui facilite la réaction de l'oxygène et de l'hydrogène. Il est généralement composé de nanoparticules de platine très finement posées sur du papier carbone ou du tissu. Le catalyseur est rugueux et poreux de sorte que la surface maximale du platine peut être exposée à l'hydrogène ou à l'oxygène. Le côté du catalyseur revêtu de platine fait face à la membrane échangeuse de proton.

La structure de la cellule est représentée dans la Fig.2.5. Les gaz proviennent de canaux conçus dans les plaques bipolaires (épaisseur 1-10 mm). Les couches de diffusion (100-50 μ m) assurent la bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 μ m). Ces couches constituent les électrodes de la cellule faites de particules de Platine, qui jouent le rôle de catalyseur, déposé sur un support en carbone sur la membrane.

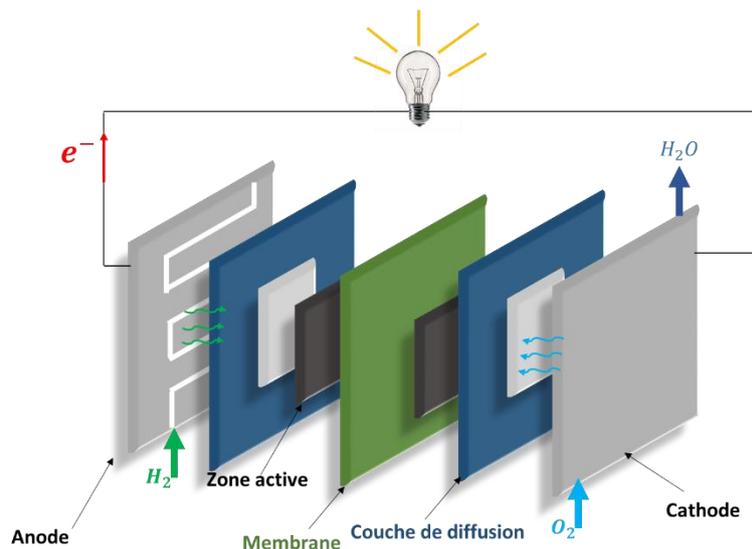


Fig. 2.5. Architecture d'une cellule de la PàC

En récapitulant, la membrane est prise en sandwich entre deux électrodes (anode et cathode) faites d'un matériau très conducteur comme le graphite poreux [32]. Ceci permet d'obtenir le contact maximum possible entre l'électrode, l'électrolyte et le gaz. Une particularité des PEMFC est que leur température de fonctionnement se situe entre 50 et 100°C ce qui permet un fonctionnement sans isolation thermique. La membrane électrolytique polymère est un isolant électronique mais un excellent conducteur de protons. Lorsque la membrane s'hydrate, les protons deviennent mobiles [32]. L'épaisseur de la membrane varie de 50 à 175 μ m, une fine couche de platine est appliquée sur la surface de l'anode et de la cathode pour aider à augmenter la vitesse de réaction. La structure d'un

assemblage électrolyte membrane (MEA) est un assemblage d'anode, d'électrolyte et de cathode, les trois étant scellés ensemble, cette structure ayant une épaisseur inférieure à un millimètre [32].

Cependant, le fonctionnement d'une PàC nécessite plusieurs auxiliaires, tels que compresseur, humidificateur, convertisseur de puissance, ...etc. c'est pourquoi l'efficacité des piles à combustible est réduite [33]. De plus, la réponse dynamique des piles à combustible est limitée par l'alimentation en gaz et donc le système PàC est incapable de fournir de la puissance à haute fréquence [34].

De plus, comme d'autres dispositifs électriques, il y a des résistances électriques dans la PàC, la perte associée à la résistance est dissipée sous forme de chaleur, qui s'ajoute à la chaleur libérée par les réactions chimiques de la PàC.

Pour une gestion adéquate des gaz, plusieurs circuits auxiliaires sont nécessaires pour former un système PàC comme le circuit d'hydrogène, le circuit de refroidissement, le circuit d'air et le circuit d'humidification. Le circuit d'hydrogène peut fonctionner en trois modes : (i) mode fermé : la vanne de sortie d'hydrogène se ferme, elle s'ouvre uniquement pour assurer la purge. (ii) mode ouvert : implique que le reste de l'hydrogène après avoir traversé l'anode est libéré vers le condenseur de l'eau utilisé par le système de refroidissement. (iii) mode rétroaction : l'hydrogène en excès est réinjecté dans la cellule.

2.2.3 Modélisation des piles à combustible

Différentes études approfondies ont été menées sur la modélisation de la PàC, des modèles statiques présentés dans [35] [28] [36] [37] aux modèles dynamiques complexes présentés dans [38][39][40]. Où, dans [38], les auteurs présentent un modèle orienté contrôle fondé sur la réaction électrochimique et le comportement interne dynamique des gaz, dans [39] les équations de régulation du comportement transitoire d'une PàC sont présentées en considérant la gestion de l'eau dans le stack de PàC. Dans [40] un modèle électrique dynamique d'une PEMFC a été développé en étendant une description statique du courant pour inclure le paramètre de la température. Des modèles purement de simulation qui prenaient en compte la représentation des auxiliaires et des phénomènes thermiques peuvent être trouvés dans [41][42]. Les modèles intéressants présentés dans les travaux de [43] fondé sur les variables transitoires en courant et en tension d'une PàC peuvent être utiles pour le suivi de l'état de santé de la PàC. En raison de l'application potentielle de la PàC dans le domaine du transport, des modèles de PàC dédiés aux applications pour les véhicules électriques sont disponibles dans les travaux de [44].

Dans ce travail de thèse, le modèle statique de la PàC considéré est celui de Larminie et Dicks. La variation de la tension individuelle de la cellule est trouvée à partir de la tension maximum et diverses

tensions de pertes. La tension de sortie d'une cellule de la PàC V_{FC} peut être définie comme le résultat de l'expression statique non-linéaire suivante [45]:

$$V_{FC} = E_0 - A \cdot \log\left(\frac{i_{FC} - i_n}{i_0}\right) - R_m(i_{FC} - i_n) + B \cdot \log\left(1 - \frac{i_{FC} - i_n}{i_{lim}}\right) \quad 2.1$$

$V_{FC} = f(i_{FC})$, E_0 est la tension réversible sans pertes de la PàC, i_{FC} est le courant délivré par la PàC, i_0 est le courant d'échange caractérisant les échanges électrode-électrolyte, A est la pente de la droite de Tafel, i_{lim} courant de limitation, B est la constante de transfert de masse. i_n est le courant interne, R_m est la résistance de la membrane et de contact.

Avec :

$$E_0 = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-3}T_{fc} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad 2.2$$

T_{fc} : température au niveau de la PàC

P_{H_2} : pression partielle de l'hydrogène

P_{O_2} : pression partielle de l'oxygène

De ce fait, la courbe de caractérisation de la PàC est composée de trois régions correspondantes à :

- **Région d'activation** : représente la polarisation d'activation, elle se produit à faible densité de courant, le potentiel des cellules diminue de façon exponentielle en raison de la lenteur des réactions chimiques qui se produisent à la surface des électrodes. Autrement dit, la surtension d'activation est produite par le transfert d'électrons et la rupture des liaisons chimiques dans la cathode et l'anode [46]. Une quantité d'énergie est utilisée pour conduire les électrons vers et depuis les électrodes. En raison de la différence entre la vitesse des réactions dans l'anode et dans la cathode, la perte d'activation est principalement déterminée par le processus de la cathode. Selon la température et la pression de fonctionnement, le type d'électrode et le catalyseur utilisés, cette zone est plus ou moins large. L'équation de Tafel est la meilleure façon de décrire le rapport entre la perte d'activation et la densité de courant :

$$V_{act} = A \cdot \log\left(\frac{i_{FC} - i_n}{i_0}\right) \quad 2.3$$

- **Région ohmique** : représente la deuxième région, qui se produit à des densités de courant intermédiaires. Les pertes de tension causées par la résistance ohmique deviennent significatives et résultent principalement de la résistance due à la circulation des ions dans l'électrolyte (membrane) et de la résistance à la circulation des électrons à travers les

électrodes. La chute de la tension ohmique est proportionnelle à la densité du courant qui est donnée par :

$$V_{ohm} = R_m(i_{FC} - i_n) \quad 2.4$$

La résistance ohmique est fonction de la conductivité de la membrane, qui est également fonction de la teneur en eau de la membrane et de la température de la PàC. Comme cité dans les travaux de [28], la teneur en eau peut prendre des valeurs entre 0 et 14 (qui sont équivalent à une humidité relative de 0% et 100%, respectivement).

- **Région de concentration** : Cette perte produit une chute de tension rapide à forte demande de courant. Les effets de masse dominant en raison de la limite de transport du gaz réactif à travers la structure poreuse des couches de diffusion du gaz et de l'électro catalyseur, et la performance des cellules diminuent considérablement. La relation suivante définit les pertes de concentration :

$$V_{con} = B \cdot \log \left(1 - \frac{i_{FC} - i_n}{i_{lim}} \right) \quad 2.5$$

Le processus de la PàC est un phénomène irréversible, une certaine partie de l'énergie chimique est convertie en chaleur et la tension V_{FC} est plus faible que la tension à vide E_0 qui est la tension du circuit ouvert (appelée aussi tension de Nernst). En effet, la tension calculée par Eq.2.3 est la tension d'une seule cellule, la tension finale V_{st} est obtenue en multipliant cette tension par le nombre de cellules assemblées. Pour cela, la tension finale est donnée par :

$$V_{st} = n \times V_{FC} \quad 2.6$$

La Fig.2.10 montre l'influence de chaque phénomène de perte sur la tension nominale d'une cellule. On peut voir que les pertes d'activation sont celles qui façonnent le plus fortement la tension de sortie de la PàC.

Considérant que la PàC se comporte comme une source de tension avec des pertes internes décrites précédemment, cela, convient pour proposer un schéma électrique équivalent qui prend en compte les caractéristiques internes de la PàC. Comme décrit dans la plupart des travaux dans la littérature [47] [46], la double couche de charge interne se comporte comme, et peut être modélisée par, un condensateur. Les changements produits dans la charge de cette double couche ont produit une tension qui est la combinaison de l'effet d'activation et de concentration. De plus, cette capacité retarde la dissipation des charges électroniques au voisinage de l'interface électrolyte/électrode qui implique l'apparition d'un délai entre les effets d'activation et de concentration et les changements brusques du courant de la PàC. Ce délai n'apparaît pas dans les pertes ohmiques, où la réponse à la variation de la charge est instantanée. Par ailleurs, les pertes ohmiques sont liées au débit d'hydrogène et des électrons. Enfin, la tension de Nernst est modélisée par une source de tension.

Le modèle dynamique de Larminie et Dicks est donné par le circuit électrique équivalent de la Fig.2.6 :

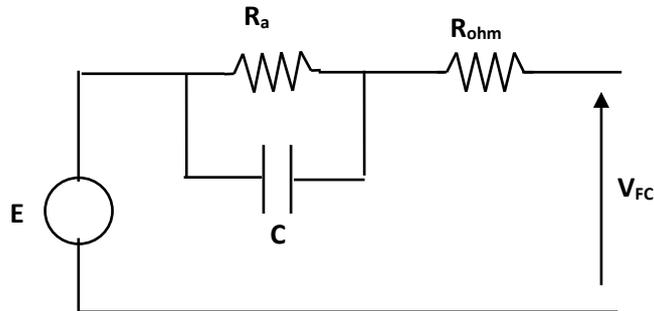


Fig.2.6. Modèle dynamique de Larminie et Dicks de la PàC

2.2.4 Simulation et validation expérimentale

Plusieurs approches ont été utilisées pour modéliser le comportement d'une PàC. Nous avons choisi pour notre travail de thèse, le modèle statique de Larminie et Dicks (Fig.2.6). Ce modèle a été validé en pratique en utilisant une PàC à membrane échangeuse Ballard à cathode ouverte.

Ce travail fut réalisé à travers ma participation dans le montage d'un banc d'essai dans le cadre d'un projet avec Ségula dans le but de la réalisation d'un système hybride destiné à l'application d'un Drone électrique à base de PàC. La PàC de type Ballard utilisée dans cette étude présente les caractéristiques selon le fournisseur du tableau 2.2 :

Tableau 2.2 caractéristiques de la PàC utilisée

Paramètre	Valeur
Puissance (Nominale)	810W
Courant	0 à 75A
Pression d'entrée	0.16 – 0.56bar
Masse	5kg
Volume	363x103x150mm

Remarques :

Le courant de la PàC utilisée est de 75A que le stack peut fournir en continu. Un courant négatif ne doit jamais être appliqué car il cause des dommages irréversibles à la PàC.

Un banc de test de la PàC a été monté et illustré dans la Fig.2., dédié à la caractérisation de la PàC et par la suite la validation des résultats d'expérimentation par confrontation avec la simulation.

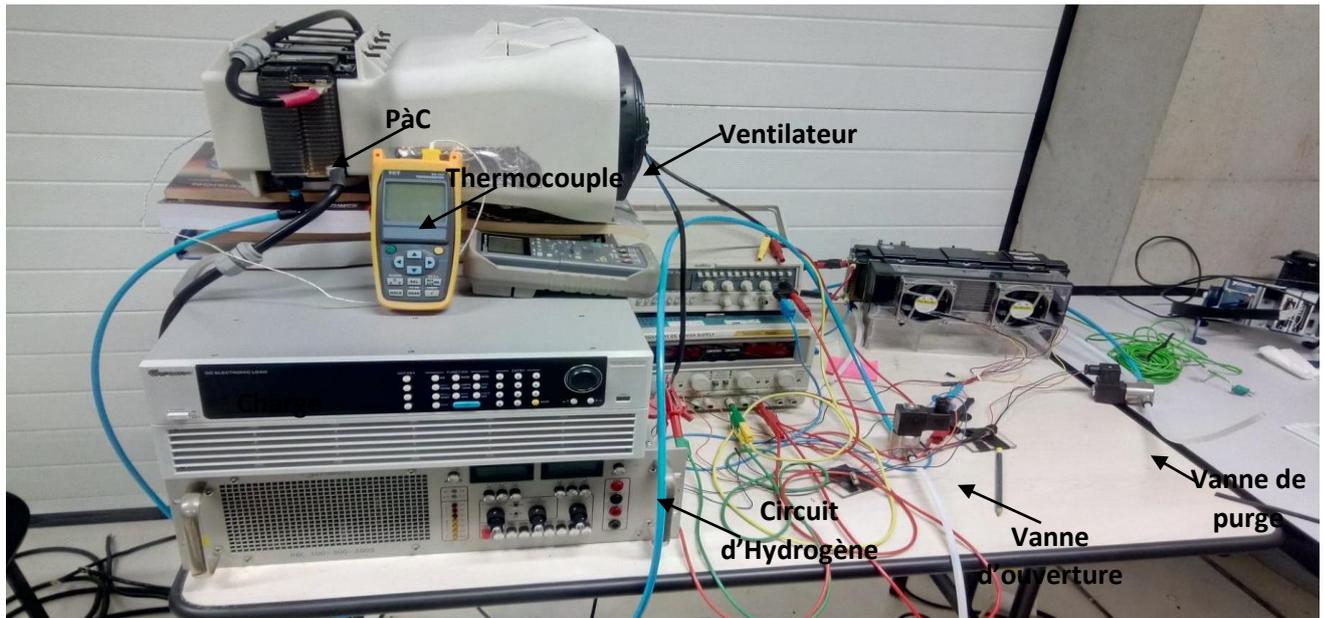


Fig.2.7. Banc d'essai pour la caractérisation de la PàC

Le banc d'essai est composé d'une PàC Ballard de type cathode ouverte, une charge électronique programmable d'une puissance de 2kW, une pince ampèremètre, un ventilateur de refroidissement et une alimentation pour alimenter le ventilateur et les électrovannes.

En imposant un échelon de courant de la charge, la PàC devra répondre à cet appel. Par conséquent, la tension est tracée en fonction du courant à chaque changement du courant d'appel de la charge. Les différentes courbes issues de ce test de caractérisation sont représentées comme suit : les courbes de variation du courant, de la tension et de la puissance en fonction du temps sont représentées dans la Fig.2.

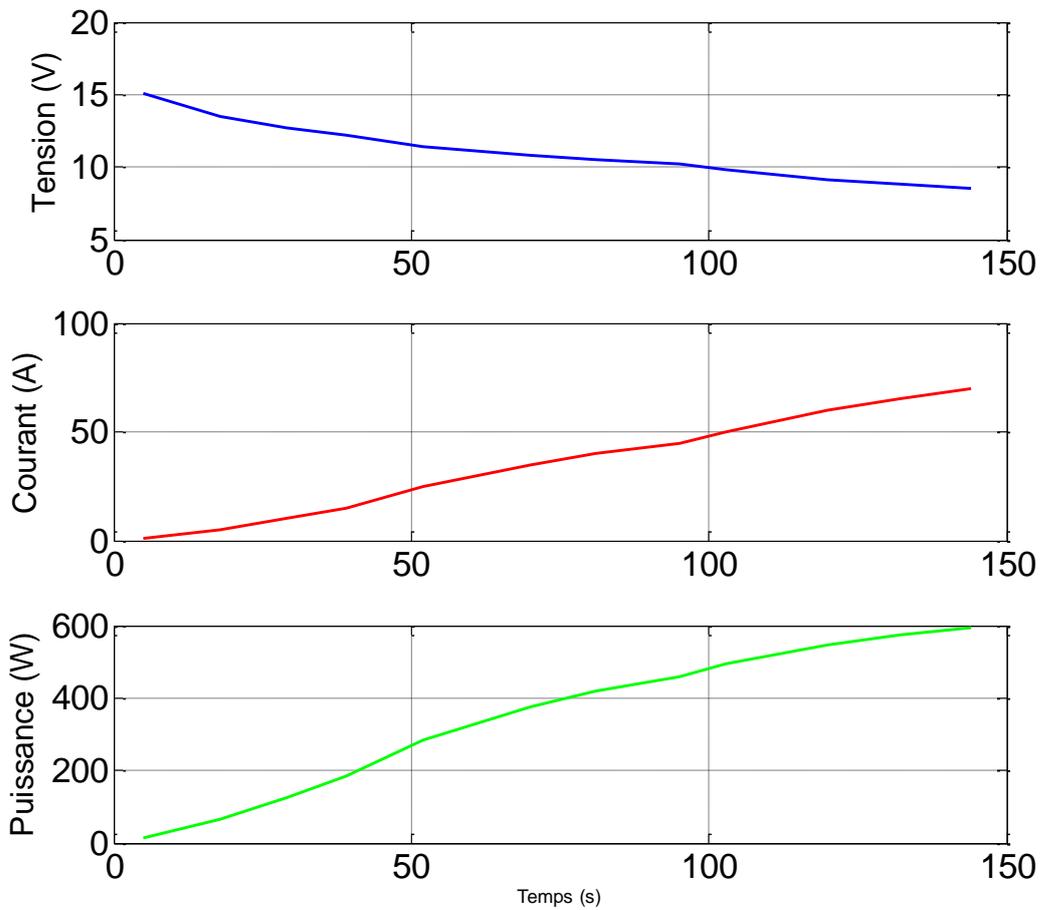


Fig.2.8. Tension, Courant et puissance de la PàC en fonction du temps

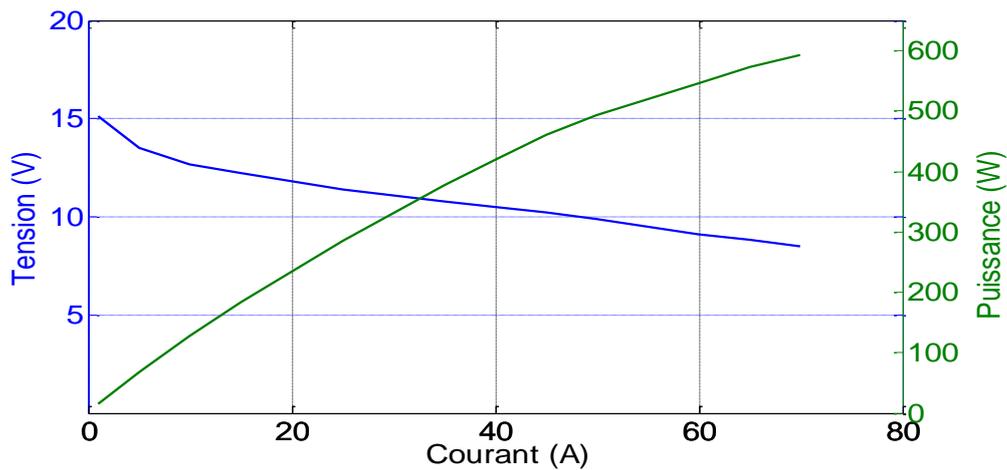


Fig.2.9. Courbe de polarisation de la PàC

Sur les courbes de la Fig.2.8, nous observons qu'à $t = 142s$, le courant atteint sa limite définie dans notre test à une valeur de 70A, ce qui correspond à une valeur de tension de 8.5V, avec une puissance calculée de 595W.

En appliquant un programme d'identification des paramètres de la PàC et en utilisant les résultats expérimentaux obtenus à partir des tests effectués sur la PàC Ballard (banc du test de la Fig.2.7), les paramètres de ce modèle ont été ajustés afin que les résultats de simulation correspondent aux résultats expérimentaux. Ceci, nous a permis d'obtenir les paramètres empiriques qui décrivent la courbe caractéristique du comportement. Ainsi, la courbe de polarisation simulée a été validée expérimentalement comme montre la Fig.2.10. Ces figures montrent l'influence de chaque phénomène de perte sur la tension nominale d'une cellule. On peut voir que les pertes d'activation sont celles qui façonnent le plus fortement la tension de sortie de la PàC.

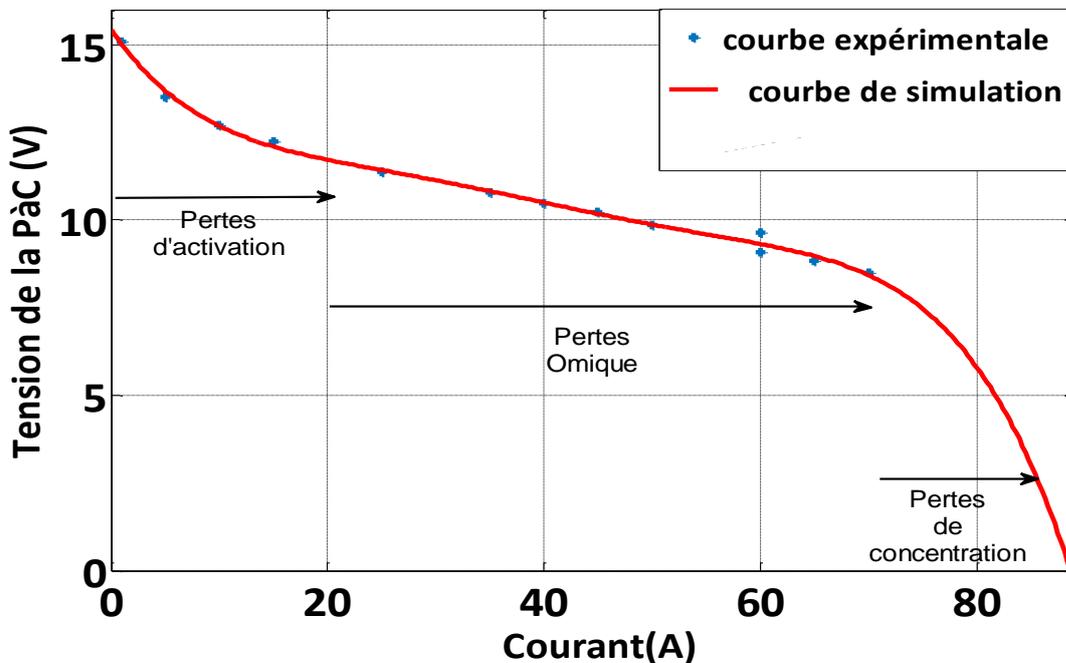


Fig.2.10. Courbe de polarisation de la PàC : expérimental et simulation

La Fig.2.10 montre la superposition des résultats de simulation et d'expérimentation pour une PàC de 810W disposant de 18 cellules. La courbe en croix bleue représente le courant extrait de la PàC et imposés par la charge sous forme d'échelon. Ce courant joue le rôle d'une perturbation pour la PàC. La tension simulée est très proche de la tension obtenue expérimentalement.

La Fig. 2.11 illustre la courbe caractéristique donnée par le fabricant de la PàC utilisée dans le banc du test de la Fig.2.7.

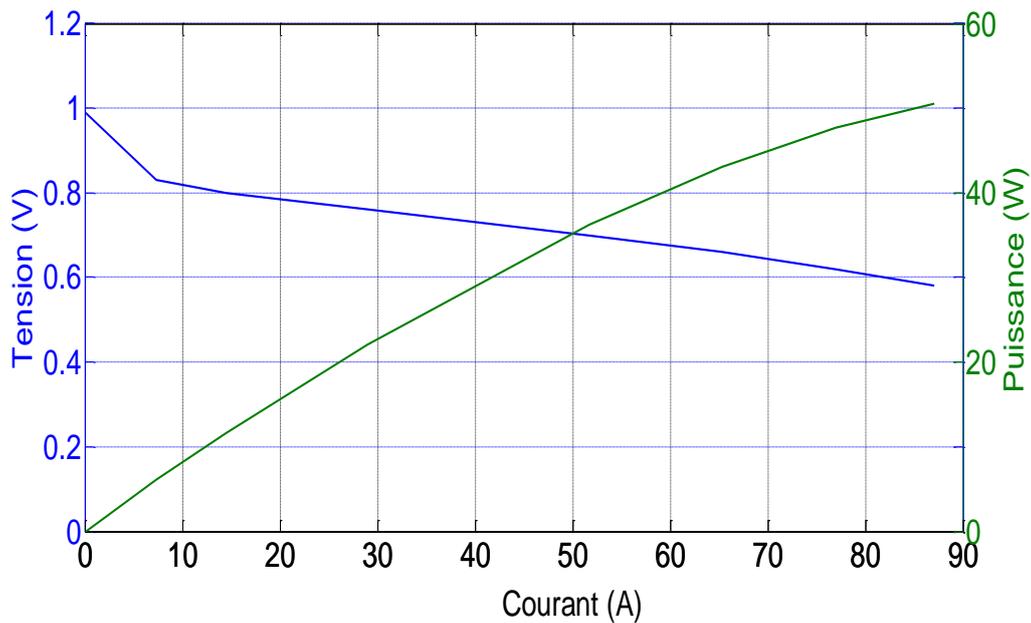


Fig. 2.11. Caractéristique de la PàC courant, tension et puissance : expérimental

2.2.5 Les avantages et inconvénients

En comparant aux VE alimentés par batteries, les PàC sont plus adaptées pour les applications des véhicules électriques. Grâce à leur densité de puissance élevée, le type l'électrolyte solide, longue durée de vie, ainsi que leur faible corrosion, ils fonctionnent dans une plage de température qui permet une exploitation plus sûre et en éliminant le besoin d'isolation thermique. La PàC produit de l'énergie électrique en continu tant que le carburant est disponible, ce qui augmente l'autonomie du véhicule électrique. En comparant avec le moteur à combustion interne, la PàC présente l'avantage d'un rendement énergétique élevé et d'émission nulle grâce à la conversion directe du carburant en énergie électrique sans subir de combustion. Toutefois, malgré les récents avancements liés à l'utilisation des PàC dans le domaine des véhicules électriques, ces derniers présentent encore de nombreux obstacles qui les empêchent d'être plus compétitifs que les véhicules à moteur à combustion interne. Il s'agit du stockage d'hydrogène et la complexité de leurs composants annexes, à savoir la régulation de la pression, compression, système de gestion de l'air et de la chaleur. D'autre part, la distribution d'hydrogène à grande échelle nécessiterait une mise à jour complète du système de distribution du carburant actuel qui rend la technologie PàC si coûteuse. Le principal inconvénient du véhicule PàC est sa faible performance dynamique transitoire.

2.3. Sources de stockage d'énergie

Actuellement, le VEH domine le marché des véhicules moins polluants et dans un proche horizon, on s'attend à ce que la majorité des ventes des véhicules neufs soit les véhicules électriques [48]. La principale clé de ce développement révolutionnaire est l'utilisation des sources de stockage. Le

stockage d'énergie est considéré comme le cœur du véhicule électrique. En effet, un certain nombre de critères en matière du stockage de l'énergie s'appliquent dans le domaine de l'automobile, telles que la puissance spécifique, l'énergie spécifique, l'efficacité, l'entretien, le coût, la gestion et la sécurité. En effet, pour un VE, l'énergie spécifique est la première considération puisqu'elle limite l'autonomie du véhicule. Dans les sections suivantes, plusieurs types de stockage d'énergie ont été proposés et utilisés comme source embarquée pour l'application du transport. Ces sources de stockage d'énergie comprennent principalement des batteries et des SCs. Pour cela, il est important de comprendre le principe de base des différentes sources et les exigences spécifiques de la source d'alimentation des VEs.

2.3.1 Batteries

Les batteries sont des accumulateurs électrochimiques qui stockent l'énergie chimique qui peut être convertie en énergie électrique et comme il s'agit d'une source bidirectionnelle, l'énergie électrique peut être convertie en énergie chimique. En raison de leur énergie et de leur puissance spécifique, leur réversibilité et leur coût relativement faible (par rapport aux autres technologies), les batteries sont l'une des sources les plus attrayantes à utiliser dans les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides. Cependant, elles nécessitent encore des recherches approfondies sur des questions telles que la fabrication, la sécurité ou le recyclage [15].

2.3.1.1 Principe de base des batteries

Une cellule d'une batterie est composée de deux électrodes connectées entre elles afin de créer une différence de potentiel comme le montre la Fig.2.12. Ces électrodes sont séparées par un électrolyte qui permet d'assurer la circulation des ions de l'anode vers la cathode et interdire le passage des électrons. En effet, la seule différence entre les batteries et les PàC est l'absence d'un apport externe de carburant dans les batteries [49].

La batterie au plomb acide est composée de deux électrodes dans un électrolyte : une plaque de plomb (Pb) et une plaque de dioxyde de plomb (PbO_2) en suspension dans de l'acide sulfurique (H_2SO_4) comme illustré dans la Fig.2.12.

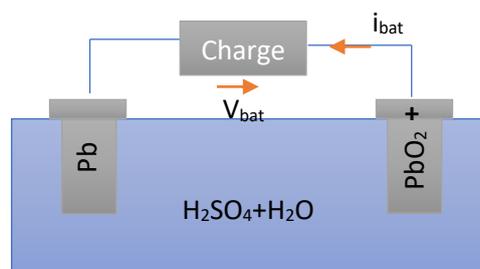


Fig.2.12 Batterie au plomb acide

Lorsque la charge électrique est connectée (décharge), les électrodes réagissent avec l'acide sulfurique. Cette réaction libère des électrons (courant électrique) et produit du sulfate de plomb dans les électrodes et de l'eau dans l'électrolyte. La réaction réversible nécessite une alimentation en énergie électrique (recharge). Ce principe de fonctionnement est similaire pour tous types de batteries mais les réactions ne sont pas les mêmes, vu que les éléments constitutifs ne sont pas les mêmes.

Les batteries en général restent une technologie intermédiaire vu son énergie et sa puissance spécifique ; ceci peut être observé à travers la courbe de Ragone illustré dans la Fig.2.2 qui montre que les batteries présentent moins de puissance spécifique que les SCs et moins d'énergie spécifique que les PàC associées à leur réservoir d'hydrogène. Pour cette raison, les solutions de gestion d'énergie des batteries ne varient pas beaucoup avec leurs différentes technologies [50].

2.3.1.2 Modèle électrique des batteries "Modèle de Thévenin"

La modélisation de la batterie est une tâche importante afin de l'utiliser de manière efficace, estimer son état de charge et de la protéger contre les décharges profondes qui peuvent provoquer leur endommagement de façon irréversible [50]. Plusieurs paramètres influencent l'efficacité de la batterie et son fonctionnement à savoir le courant de charge, la température et le SOC [50].

Dans la littérature plusieurs modèles de batterie ont été proposés et particulièrement selon la technologie choisie et le domaine d'utilisation. Le modèle le plus simple est celui d'un circuit électrique composé d'une source de tension en série avec une résistance interne, ce modèle est connu par le modèle de "Thévenin". Un tel modèle néglige la dynamique de l'électrochimie. Cependant, ces dynamiques sont relativement rapides et peuvent être négligées pour un modèle dédié aux considérations énergétiques. Le circuit équivalent est représenté dans la Fig.2.13 ;

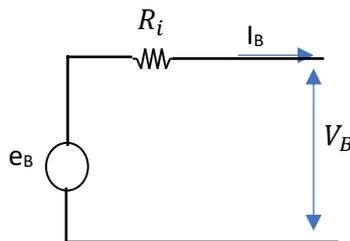


Fig.2.13. Circuit électrique du Modèle Thévenin

où e_B est la tension du circuit ouvert de la batterie et dépendant de l'état de charge. La variable R_i est la résistance interne définie comme une fonction de l'état de charge mais aussi de la direction du courant de la batterie. Ce modèle simple permet d'exprimer la tension en sortie de la batterie comme suit :

$$V_B = e_B - R_i \times i_B \quad 2.7$$

Les pertes en énergie de la batterie des processus de charge et de décharge sont modélisées par la résistance interne qui dépend de nombre de cellules et de la configuration de la batterie. Comme déjà mentionné, le SOC de la batterie est l'un des paramètres importants dans la modélisation de la batterie. De plus, la résistance interne est le facteur majeur de limitation du courant de charge ou de décharge.

2.3.1.3 Paramètres de charge et de décharge

La fonction principale de la batterie dans les systèmes hybrides est de fournir l'énergie lorsque la source primaire n'en est pas capable. Par conséquent, les batteries dans les sources hybrides subiront des cycles de charge et de décharge. Les paramètres de la batterie sont affectés par les cycles de charge et de décharge et qui sont :

2.3.1.3.1 Etat de charge des batteries

Le paramètre clé de la batterie est l'état de charge. Ce dernier est une quantité sans dimension déterminée comme le rapport entre la capacité résiduelle $Q_{résiduelle}$ et la capacité nominale Q_n de la source de stockage de l'énergie telle que déterminé dans (Eq.2.2). En effet, le SOC est un indicateur de la quantité d'énergie disponible et son estimation est fondamentale pour la gestion de l'énergie. Dans, les batteries, le SOC dépend de multiples facteurs tels que le courant, l'historique de décharge, l'âge, l'autodécharge, etc. Pour cela, l'estimation du SOC dans les batteries est une tâche difficile.

$$SOC = \frac{Q_{résiduelle}}{Q_n} \quad 2.8$$

Quand les modèles théoriques sont utilisés pour estimer le SOC, les résultats sont fondés sur les paramètres estimés et/ou hypothèses de simplification.

La méthode de Coulomb Counting (connue sous la méthode d'intégration du courant) est retenue et la plus utilisée pour estimer le SOC et consiste à mesurer la tension du circuit ouvert de la batterie au démarrage pour estimer le SOC initial en utilisant les informations de datasheet de la batterie. Ensuite, le courant de la batterie est intégré pour estimer la quantité de charge fournie (ou récupérée compte tenu d'une charge) par les batteries. Cette méthode est formellement présentée par :

$$SOC = SOC_0 - \frac{100}{Q_n} \int i_B dt \quad 2.9$$

Avec

SOC_0 est la valeur initiale du SOC, Q_n est la valeur nominale de la capacité de la batterie en (Ah). La plupart des chercheurs utilisent un protocole de test qui vise à décharger et à charger complètement la batterie afin d'estimer un état de charge initiale. L'intérêt de cette méthode réside dans sa simplicité et sa souplesse (cette méthode peut être améliorée en considérant les pertes ou le vieillissement). Les

principaux inconvénients de cette approche simplifiée sont les mesures imprécises qui induit l'accumulation des erreurs [49], [51].

2.3.1.3.2 Profondeur de la décharge de la batterie

Dans différents types de batteries, l'énergie stockée dans la batterie ne peut pas être retirée complètement, (en d'autres termes, la batterie ne doit pas être déchargée complètement), sans causer des dommages graves et souvent irréparables à la batterie. La profondeur de décharge de la batterie détermine la fraction de puissance qui peut être retirée de la batterie. Presque toutes les batteries sont classées en fonction de leur capacité. Cependant, l'énergie réelle qui peut être extraite de la batterie est souvent nettement inférieure à la capacité nominale. Cela se produit, en particulier pour les batteries au plomb-acide, l'extraction de la pleine capacité de la batterie réduit considérablement sa durée de vie.

2.3.1.4 Technologies des batteries utilisables en embarqué

Plusieurs types de batteries existent, les types les plus populaires des batteries sont les suivants :

2.3.1.4.1 Batterie à l'Acide-Plomb :

La batterie au plomb est un produit commercial à succès depuis de nombreuses années et est encore largement utilisée comme accumulateur d'énergie électrique dans le domaine de l'automobile et d'autres applications. Les principaux avantages et inconvénients de cette technologie de batterie sont résumés dans le Tableau 2.3 :

Tableau. 2.3 Avantages et inconvénients de la batterie Acide-Plomb

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Moins chère et simple à fabriquer- Fiable et facile à comprendre- Faible autodécharge- Faible maintenance requise	<ul style="list-style-type: none">- Faible densité énergétique- Nombre limité de cycles de décharge complète- Non écologique- Emission thermique en cas d'un chargement incorrecte

Différentes batteries à l'acide plomb aux performances améliorées sont en développement continu pour les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides. Des améliorations des batteries au plomb acide concernant une énergie spécifique supérieure avec la possibilité d'une charge rapide ont été réalisées. Les performances compétitives atteintes pour ce type de technologie de batterie et une énergie spécifique élevée (43Wh/kg), une puissance spécifique élevée (285 W/kg), une longue durée

de vie (plus de 600 cycles pour une utilisation routière), une capacité de recharge rapide et une solidité mécanique.

2.3.1.4.2 Batterie à base de Nickel-Cadmium (NiCd):

Le Nickel est un matériau plus léger que le plomb et présente des propriétés électrochimiques adéquates pour les applications utilisant des batteries. Ce type de batterie utilise un électrolyte à base d'hydroxyde de potassium, une anode en cadmium et une cathode à base de Nickel. La technologie de la batterie Ni-Cd a connu des améliorations techniques grâce aux avantages d'une puissance spécifique élevée, d'une longue durée de vie, d'une tolérance élevée aux excès électrique et mécanique, d'une faible chute de tension sur une large gamme de courant de décharge, d'une capacité de charge rapide, d'une large température de fonctionnement, d'une faible autodécharge et un bon stockage à long terme en raison d'une corrosion négligeable [52]. Le tableau 2.4 résume les principaux avantages et les inconvénients de la technologie de batterie Ni-Cd dédiée pour les applications automobiles :

Tableau. 2.4 Avantages et inconvénients de la batterie Nickel-Cadmium

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Nombre élevé de cycles de charge/décharge.- Recharge à faible température.- Cout faible en termes de cout par cycle	<ul style="list-style-type: none">- Densité énergétique relativement faible comparativement aux systèmes plus récents.- Processus de charge complexe à cause de l'effet de mémoire.- Non écologique, NiCd est un élément toxique.

2.3.1.4.3 Batterie à base de Nickel-Metal Hydrure (Ni-MH):

Ce type de batterie est semblable à celle au Ni-Cd, à l'exception de l'anode qui est à base de métal hydrure (hydrogène absorbé par un métal). Ce type de technologie est très intéressante pour les applications dans les VE et les VEH (PàC/batterie et PàC/batterie/SC). Ce type de batterie est généralement utilisé pour les applications de forte puissance en raison de leur faible résistance interne [52]. Dans le domaine du transport, ce type de batterie représente un type intermédiaire entre les batteries à base d'acide de plomb et celle de type de lithium en termes à la fois du coût et de la densité énergétique. Le tableau 2.5 présente quelques avantages et inconvénients de ce type de batterie pour les applications automobiles :

Tableau. 2.5 Avantages et inconvénients de la batterie Nickel-Metal Hydrure

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Energie spécifique élevée par rapport aux batteries NiCd - Processus de stockage simple - Ecologique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie limitée, les performances commencent à se dégrader après 200 à 300 cycles. - Courant de décharge limité - Performances se détériorant si le stockage se fait à des températures élevées.

2.3.1.4 Batterie à base de Lithium

Le Lithium est le métal le plus léger et présente des caractéristiques électrochimiques intéressantes. La technologie des batteries à base de lithium est basée sur un électrolyte sous forme de polymère solide ou liquide, elle présente des caractéristiques importantes en termes d'énergie spécifique et de puissance spécifique élevées. Cette technologie de Lithium est considérée comme la batterie la plus prometteuse dans le domaine du transport. Cette technologie s'est considérablement améliorée ces dernières années en raison de son utilisation dans l'électronique telles que les ordinateurs et les téléphones portables. Les batteries à base de Lithium ion ont des densités d'énergie et de puissance élevées par rapport aux autres batteries, ce qui signifie que les véhicules à batteries basés sur ce type de technologie sont devenus une technologie compétitive par rapport aux véhicules conventionnels pour des trajets de courte distance. Les principales caractéristiques des batteries Lithium ion sont résumés dans le tableau 2.6 :

Tableau. 2.6 Avantages et inconvénients de la batterie Lithium

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Densité énergétique élevée - Facteur de forme flexible - Autodécharge inférieure à celle du NiCd et du NiMH - Peu d'entretien - Poids léger 	<ul style="list-style-type: none"> - Cout de fabrication élevé - Nécessite un circuit de protection

Le Tableau 2.7 présente un récapitulatif des caractéristiques des différentes technologies des batteries dédiées aux applications véhiculaires. Il existe un grand nombre de paramètres de batterie. Selon l'application pour laquelle la batterie est utilisée, certains paramètres sont plus importants que d'autres. Voici une liste des paramètres qui peuvent être spécifiés pour un type de batterie donné. Par exemple, dans une batterie typique pour une voiture conventionnelle, la densité d'énergie n'est pas pertinente, une batterie représente une petite fraction du poids total de la voiture et, par conséquent,

ce paramètre ne serait généralement pas indiqué dans une batterie de voiture classique. Toutefois, dans le cas des véhicules électriques, le poids de la batterie représente une fraction significative du poids total du véhicule et les densités énergétiques seront donc données.

Tableau. 2.7 caractéristique des Principales batteries [53]

	Densité énergie (Wh/kg)	Cycle de vie	Densité de puissance W/kg	Température de charge	Température de décharge
Acide-Plomb	35	500-1000	80-150	-20-50°C	
NiCd	55	800	150-400	0-45°C	-20 – 65°C
NiMH	80	750-1200	200-1000		-20 – 60°C
Li-Ion	100	1000	500-4000		

2.3.2 Supercondensateurs

Les SCs connus sous le nom de condensateurs électriques à double couche. Ce sont des sources électrochimiques qui stockent l'énergie électrique qui est directement convertie et donc avec une haute efficacité [54], [55]. Cette source présente une puissance spécifique très élevée mais avec une énergie spécifique faible. Les SCs sont une alternative aux batteries dans les véhicules hybrides et sont parfois utilisés en complément d'un bloc batterie [56]–[58]. Les SC sont analogues tant en fonctionnement qu'en performance aux condensateurs conventionnels qui sont couramment utilisés pour filtrer et mettre à niveau les petits circuits électroniques.

L'une des applications des SC est dans le domaine du transport comme une source de stockage d'énergie dans les systèmes de puissances hybrides, notamment dans le VEH [20], [56]. S'ils sont utilisés correctement, ils contribuent à réduire la consommation de carburant, à améliorer les performances dynamiques et à diminuer les contraintes exercées sur les autres composants du système [59]. Les SC sont largement considérés dans les applications de transport en raison de cette puissance spécifique élevée et aussi à cause de son rendement élevé. Comme les batteries, les SCs sont composés de deux électrodes immergées dans un électrolyte. Les électrodes sont à base de carbone actif et recouvertes. L'électrolyte peut être aqueux tel qu'un acide ou un alcalin ou non aqueux comme le carbone de propylène ou l'acétonitrile [52]. Les SCs sont également très résistants aux charges transitoires et aux cycles. Cela signifie qu'ils peuvent être rechargés à des courants très élevés, tels que ceux disponibles lors d'un freinage par récupération. Un autre avantage des SCs est qu'ils nécessitent très peu d'entretien. Malheureusement, leur faible densité énergétique fait qu'ils ne conviennent qu'au stockage d'énergie à très court terme. Les SC fonctionnent bien pour réduire les dommages aux batteries et aux PàC. Les supercondensateurs ont une meilleure densité de puissance largement supérieure à celle des batteries ce qui leur offre une meilleure dynamique et par

conséquence une meilleure assistance aux PàC lors des transitoires rapides [14], [60]. Le même concept s'applique pour les SC ajoutés dans un système hybride PàC/batterie ou le SC absorbe la majeure partie des transitoires, ce qui atténue les dommages potentiels aux batteries et à la PàC. Pour les applications du VE, la source d'énergie qui peut être la PàC ou la batterie a une énergie spécifique élevée alors que la source de puissance a une puissance spécifique élevée. Les sources de puissance peuvent être rechargées à partir de la source d'énergie durant le cycle de conduite ou lors du freinage par récupération. Le principe du condensateur électrique à double couche a été remarqué pour la première fois en 1957 par les chercheurs qui ont expérimenté des dispositifs utilisant une électrode en carbone poreux [61].

Afin de comprendre comment cette augmentation du stockage d'énergie est possible dans les SC, il est important de comprendre le principe de base des SC.

2.3.2.1 Principe de fonctionnement des SC

Les SC sont des dispositifs électroniques qui utilisent la séparation de charge ou des champs électriques pour stocker l'énergie électrique. Une cellule SC se compose de deux électrodes (généralement du charbon actif de grande surface) reliées ioniquement par un électrolyte composé d'ions positifs et négatifs solubilisés dans un solvant comme l'eau. Lorsqu'une tension est appliquée à la cellule, une double couche est générée à chaque interface électrode-électrolyte, où une couche se trouve à la surface de l'électrode et l'autre couche est formée par les ions électrolyte solubilisés ayant une polarité opposée. Les deux couches sont séparées par les molécules de solvant adsorbées à la surface de l'électrode. En raison de la grande surface de l'électrode et de la distance extrêmement mince entre les deux couches, il est possible d'obtenir une grande capacité (des milliers de Farads par cellule), permettant aux SCs de stocker des milliers de fois plus d'énergie que les condensateurs électrolytiques classiques.

Lorsqu'une tension est appliquée à travers les plaques du SC, ou les bornes, les plaques se chargent en sens inverse. La plaque connectée à la borne négative de la source de tension accepte les électrons et se charge négativement tandis que la plaque connectée à la borne positive de la source de tension perd des électrons, se charge donc positivement. Le principe de base du condensateur à double couche électrique est illustré dans la *Fig.2.14*. Les électrons circulent de cette manière jusqu'à ce que la tension à travers le SC soit égale à la tension de la source. A ce point, les forces de répulsion au niveau des électrodes sont égales à la force due au potentiel appliqué. L'isolant diélectrique empêche le transfert d'électrons entre les deux électrodes, ce qui entraîne une séparation de charge et un champ électrique. En présence de ce champ électrique, le diélectrique devient polarisé, c'est-à-dire que ses ions

s'alignent avec le champ créé par les deux plaques. En effet, les sources de tension peuvent être retirées et le condensateur reste chargé jusqu'à ce qu'un circuit externe utilise l'énergie stockée.

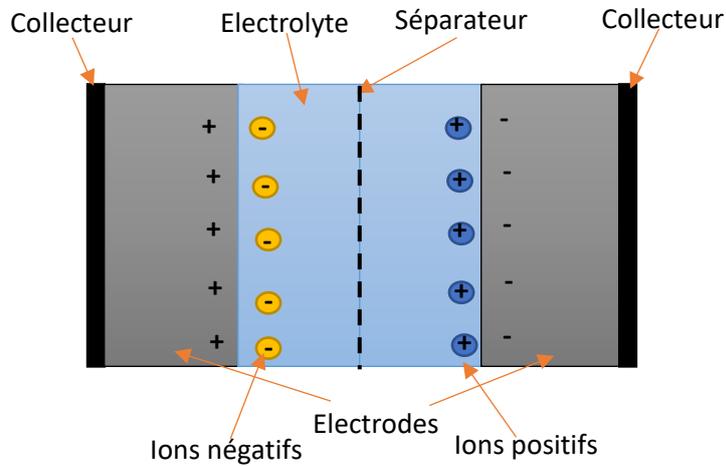


Fig.2.14. Composition interne d'un SC

Les SCs comme les batteries sont considérés comme des sources d'énergie réversibles.

2.3.2.2 Modèle électrique du SC

Ils existent différents circuits électriques équivalents des SC dans la littérature. En effet, le SC peut être modélisé par un simple circuit électrique RC en série. Le modèle de Bonert et Zubieta est fondé sur des considérations énergétiques pour établir leur modèle comportemental. Ce modèle est connu sous le nom des deux branches et il se repose sur la partition de l'énergie électrostatique des SCs en deux, une énergie rapidement stockée ou disponible, dite principale, elle rend compte de l'évolution de l'énergie durant les événements de charge ou de décharge. L'autre branche présente une énergie lentement stockée ou disponible.

Le modèle électrique fréquent donné par (Eq.2.10) est déduit du circuit équivalent du SC illustré dans la Fig.2.15. Dans ce modèle, la capacité différentielle est représentée par deux condensateurs : un condensateur constant C_0 et un condensateur linéaire kV_0 , où k est une constante correspond à la pente de la tension V_0 .

$$\begin{cases} \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C_0 + kV_0} I_{sc} \\ V_{sc} = R_{sc} I_{sc} + V_0 \end{cases} \quad 2.10$$

$$\text{Où } C_0 + kV_0 > 0$$

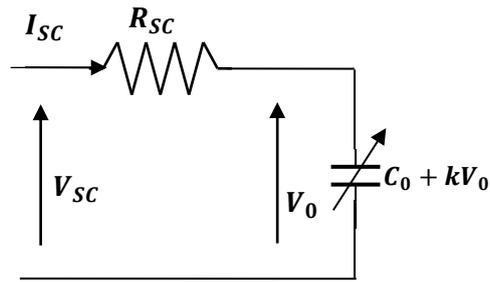


Fig.2.15. Circuit équivalent d'un SC

2.4 Convertisseurs DC/DC

Les composants communs aux VE à base de PàC sont les convertisseurs DC/DC. Ces derniers sont utilisés principalement pour augmenter ou diminuer la tension des différents composants en fonction de la tension des autres composants. Les sources hybrides étudiées disposent soit de deux convertisseurs dans le cas des sources hybrides électriques PàC/Batterie et PàC/SC, soit de trois convertisseurs pour la source PàC/batterie/SC, cela grâce aux tensions de fonctionnement différentes des sources embarquées. Les convertisseurs sont utilisés principalement pour adapter leur tension à la tension du bus DC. En effet, il y a un certain nombre d'avantages à inclure des convertisseurs dans une source hybride. Premièrement, l'introduction d'un convertisseur DC/DC contrôlable est un moyen direct de gestion de l'énergie des systèmes. Deuxièmement, la capacité d'augmenter ou diminuer la tension entre les sources et la charge donne plus de degrés de liberté à la conception de la source hybride.

Dans le paragraphe suivant, nous allons parler du mode de fonctionnement des convertisseurs boost et Buck/boost, utilisés pour les architectures des sources hybrides utilisées dans ce travail de thèse :

2.4.1 Convertisseur boost à la sortie de la PàC

Malgré les avantages des PàC énoncés dans la section précédente, certaines problématiques sont toujours en attente, en particulier sur la faible tension produite en sortie de cette dernière. En raison de la faible tension, un convertisseur DC/DC est indispensable afin d'élever cette tension jusqu'au niveau de la tension du bus DC. La Fig.2.16 présente la topologie du convertisseur boost de la PàC.

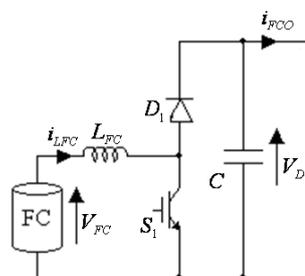


Fig.2.16. Convertisseur Boost de la PàC

2.4.2 Convertisseur buck/boost pour le système de stockage

Le choix d'utiliser un convertisseur bidirectionnel est motivé par la nature réversible du système de stockage. La notion de réversibilité concerne seulement les grandeurs de courant et de puissance. En outre, la tension aux bornes du système de stockage est toujours positive.

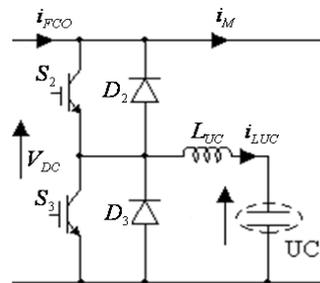


Fig.2.17. Convertisseur Buck/Boost

La PàC est considérée comme l'une des sources d'énergie de remplacement les plus prometteuses pour alimenter le véhicule en raison de sa haute densité énergétique, de ses excellentes performances et de l'absence d'émissions si on utilise de l'hydrogène issu des énergies renouvelables [4]. De nombreuses activités de recherche et de développement sont menées dans le domaine des piles à combustible. Le principal obstacle à la commercialisation des véhicules à PàC est le coût élevé de la PàC. En effet, elle peut être réduite en hybridant la PàC avec les sources auxiliaires, de sorte que la taille et le volume de la PàC peuvent être réduits. En outre, la PàC ne peut fonctionner efficacement que dans une plage spécifique. Afin de maintenir le rendement élevé de la PàC et d'optimiser l'efficacité de l'ensemble du système, on s'attend à ce que la PàC fonctionne dans la plage de rendement élevé. En outre, l'utilisation de sources auxiliaires est une nécessité imposée par quelques limitations physiques de la PàC en termes de sa dynamique lente au démarrage ainsi que sa difficulté à suivre les transitoires rapides [56], [62], [63].

Après avoir étudié chacune des sources séparément, on s'intéresse dans la suite au processus d'hybridation de plusieurs sources entre elles afin de constituer une source électrique hybride multi sources multi convertisseurs dédiées aux applications du VE. Ce qui permet d'introduire par la suite les méthodes de gestion d'énergie des systèmes hybrides.

2.1 Hybridation des sources

Le profil de puissance pour les applications de transport est généralement composé de phases permanentes et transitoires (Voir Fig.2.18). Les charges permanentes sont les charges qui consomment la même quantité d'énergie pendant toute la mission, indépendamment des actions du conducteur. Cependant, les phases transitoires sont liées aux accélérations et freinage du conducteur. La durée des transitoires ne sera que quelques secondes. Ainsi un profil de puissance d'une mission sera formé

d'une charge permanente et d'une succession de différentes charges transitoires dues aux manœuvres du conducteur. Par conséquent, le système de propulsion hybride est conçu en fonction des besoins en puissance et en énergie d'un système de propulsion hybride. Cela signifie que la PàC seule n'est pas en mesure de satisfaire la demande en puissance de la charge. Par conséquent, l'hybridation de la PàC avec d'autres sources présente une nécessité afin de garantir la demande de puissance de la charge le long du parcours et donc l'autonomie du VE.

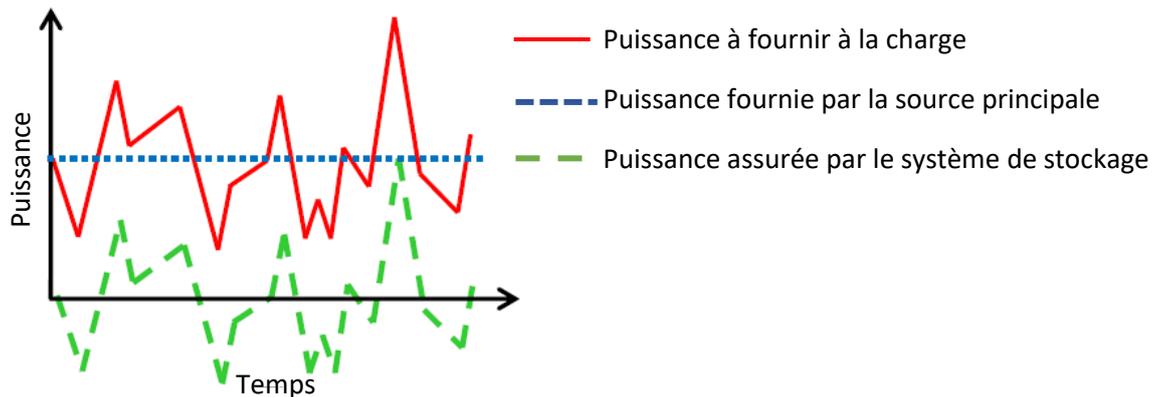


Fig.2.18 Illustration d'un partage des puissances pour une hybridation idéale

1.5.1 Notions de base de l'hybridation

Afin de comprendre le processus d'hybridation, quelques notions de base sont nécessaires :

- Hybridation de la source : pour un profil de puissance de mission donné et pour n sources utilisées, l'hybridation de la source propose de partager la puissance de charge entre toutes les sources. En fonction de la connexion des sources choisies, le partage de la puissance entre les sources peut être obtenu en appliquant une stratégie de contrôle de puissance.
- Source d'énergie : pour un profil de mission, les sources qui fournissent la majorité de puissance sont appelées sources d'énergie.
- Hybridation directe : l'hybridation est appelée directe si les sources sont connectées directement, sans aucune interface de puissance électronique. Il n'existe pas un degré de liberté dans ce type d'hybridation. Le partage de puissance est obtenu grâce aux dimensionnements des puissances des sources [33][32].
- Hybridation indirecte : cette hybridation est obtenue si les sources sont connectées à travers une interface électronique de puissance tel qu'un convertisseur.
- Hybridation idéale : dans tous types d'hybridation, la somme des puissances des sources doit être égale à la puissance de la charge. Donc :

$$P_{\text{Source d'énergie}} + P_{\text{Source de puissance}} = P_{\text{Charge}}$$

Dans ce travail de thèse, le système PàC est conçu pour répondre à la demande de la puissance de la charge dans la phase permanente, tandis que les batteries et/ou les SCs sont conçus pour aider ces derniers en périodes de pic de puissance continue et transitoire, respectivement.

2.1.1 Principales configurations

2.1.1.1 Système de stockage d'énergie

Le choix du système de stockage d'énergie dépend de divers paramètres, notamment la vitesse de recharge, la densité énergétique, la durée de vie, le coût, le poids et la taille [64]–[66]. Dans certains travaux, les batteries restent les principaux choix pour le système de stockage d'énergie comme cités dans les travaux de [67]–[70]. Les batteries ont un faible coût par watt heure, une densité d'énergie élevée mais une durée de vie de cycle courte et une faible puissance spécifique, tandis que les SC conservent une puissance de crête élevée, une longue durée de vie de cycle, un coût par watt heure élevé et une faible densité énergétique [20], [56], [71]. Les SC sont robustes, ont une durée de vie quasi-infinie et peuvent supporter des profils de puissance très dynamiques [72], [73]. De plus, les SC fournissent de la puissance à haute fréquence et à haute amplitude, tandis que les batteries répondent aux exigences de basses fréquences [74]. Le fonctionnement d'un seul dispositif de stockage est faisable mais avec une efficacité limitée, tandis qu'une combinaison des deux peut aider à surmonter leurs inconvénients. Selon, la stratégie de la commande appliquée, les SCs peuvent tolérer les surtensions pendant le fonctionnement de la batterie et maintiennent la tension du bus DC, tandis que les batteries maintiennent le SOC des SCs [56]. Par conséquent, la combinaison de ces deux éléments permettra d'obtenir une stabilité élevée de l'ensemble du système. Pour protéger les batteries des VEs et prolonger leur durée de vie, le SC est combiné avec elles [75], [76]. Les brusques variations de charge sont absorbées par le SC, ce qui permet une utilisation efficace des batteries.

2.1.1.1.1 Architecture des systèmes hybrides

Les composants clés dans un système hybride dédié pour une application VE consistent en une PàC, des systèmes de stockage qui peuvent être des batteries et/ou des SC, un réservoir d'hydrogène, des convertisseurs et la charge.

Dans les architectures étudiées dans cette thèse, les flux de puissance dans les systèmes hybrides proposés pour répondre à la demande de la charge sont résumés dans la Fig.2.17 et il existe différentes transmissions possibles entre la source principale et le système de stockage d'énergie, comme indiquée ci-dessous :

- La source principale délivre seule la puissance à la charge

La PàC délivre la puissance à la charge. Lorsque la puissance dont la charge a besoin se situe dans la plage de puissance moyenne, la PàC peut fournir cette quantité de puissance sans aucune assistance et conserver un rendement élevé.

- La source principale et le système de stockage délivre ensemble la puissance à la charge.

La charge est alimentée simultanément par la PàC et la source de puissance. Lorsque le véhicule accélère ou démarre à froid, il demande une puissance importante en très peu de temps. Dans cette phase, la puissance moyenne de la PàC ne permet pas de répondre aux besoins de la charge et la source de puissance délivre sa puissance à la charge simultanément.

- Le système de stockage prend de l'énergie de la charge (régénération par freinage)

Les sources de puissance récupèrent l'énergie de freinage de la charge. Lorsque le véhicule freine, la charge agit comme générateur et la source de puissance est capable d'absorber l'énergie du freinage pour augmenter l'efficacité du système. Comme la PàC ne peut pas absorber l'énergie, elle s'arrête pour économiser l'énergie.

- Le système de stockage prend de l'énergie de la source principale.

La PàC alimente les sources de puissance et la charge en même temps. Lorsque la charge exige moins d'énergie que la moyenne, la PàC fournit quand même la puissance moyenne nécessaire pour maintenir un rendement élevé. Une partie de la puissance de la PàC est destinée à la charge pour répondre à ses besoins et le reste de la puissance charge la source de puissance pour l'aider à maintenir son niveau de tension pour une utilisation future.

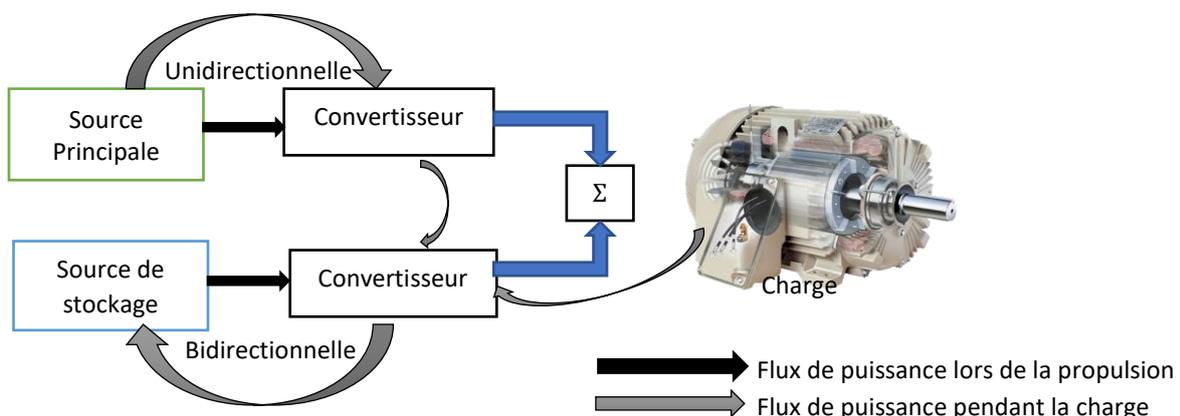


Fig.2.17 flux de puissance dans une source hybride

2.2 Stratégies de gestion d'énergie

L'un des principaux problèmes du système hybride est lié à la supervision et au contrôle de la distribution de l'énergie. L'interaction dynamique entre la demande de charge et les sources embarquées dans le système hybride et qui peut conduire à des problèmes critiques de stabilité et de qualité de l'énergie. Par conséquent, il est essentiel de gérer le flux d'énergie dans l'ensemble du système hybride afin d'assurer l'alimentation continue pour répondre à la demande de charge.

Au cours de la dernière décennie, l'intérêt des industries du transport à développer des systèmes de traction efficaces et respectueux de l'environnement a fait des véhicules à PàC une réalité. Dans ces véhicules, le système PàC est généralement assisté par des batteries et/ou des SCs, pour un démarrage et une accélération rapide ainsi que pour un freinage par récupération. Beaucoup de travaux ont été effectués pour élaborer des stratégies de gestion de l'énergie efficaces pour des systèmes hybrides à PàC destinée pour les applications véhiculaires.

En effet, l'existence de plusieurs sources dans un système hybride à PàC exige une stratégie de gestion de l'énergie qui coordonne l'énergie produite par la PàC et les autres sources. La plupart des stratégies de gestion d'énergie prend en entrée la demande du conducteur et l'état du système et, sur cette base, répartit la demande de puissance entre les sources embarquées dans un système hybride. Depuis l'introduction sur le marché des VEH, il y a eu des recherches approfondies sur la conception et l'optimisation des méthodes de la gestion d'énergie. L'objectif de toute conception de stratégie de gestion d'énergie est généralement d'exploiter les avantages de l'hybridation en réduisant au minimum la consommation de carburant et les émissions (dans le cas des véhicules à moteur à combustion interne) tout en augmentant la durée de vie des sources utilisées.

L'objectif du contrôle d'un système hybride à PàC est de répondre à la demande d'énergie de la charge tout en minimisant les fluctuations de la puissance sur la PàC, ce qui contribue à prolonger sa durée de vie. Afin de s'assurer que la demande de puissance est satisfaite, il est nécessaire que la somme de la puissance fournie à la charge par la PàC et le système de stockage soit égale à la demande de la puissance totale. Il est nécessaire de noter que cette égalité est valable juste dans le cas d'une tension de bus DC constante. En maintenant la tension du bus avec le convertisseur DC/DC de la PàC, le convertisseur DC/DC du SC et/ou la batterie offre un degré de liberté supplémentaire pour contrôler la répartition de la puissance. Autrement dit, pour prolonger la durée de vie de la PàC et réduire la consommation de l'hydrogène, il est souhaitable de réduire au minimum les transitoires sur la PàC. C'est pourquoi, la PàC est destinée à un fonctionnement dans une phase constante et que les modules de la source de stockage absorbent et/ou fournissent toute variation de la puissance.

Beaucoup de travaux ont été menés pour élaborer des stratégies de gestion de l'énergie pour les VEH. On peut classer les techniques de gestion d'énergie en deux groupes : un premier groupe qui nécessite une connaissance préalable du cycle de conduite et un second groupe qui utilise uniquement des informations en temps réel. Pour mieux comprendre les stratégies de gestion de l'énergie des véhicules hybrides à plusieurs sources d'énergie embarquées, de nombreuses études ont été réalisées par divers auteurs et sont disponibles dans la littérature.

Dans les travaux de [77], les auteurs ont étudié la gestion énergétique des systèmes multi sources (PàC, batterie et SC) utilisés dans les VE légers. Le régulateur PI est utilisé pour une gestion efficace de l'énergie. Le résultat fut satisfaisant avec un rendement VEH estimé couramment de 94 % comparant à 84,9 % obtenu à partir d'un système alimenté uniquement par la batterie, surtout en mode accélération. Dans [77], cinq stratégies de contrôle ont été rapportées pour un véhicule hybride composé de PàC/Batterie/SC, qui sont : le contrôle du mode de fonctionnement, le contrôle en cascade, le contrôle en logique floue, le contrôle de la stratégie équivalente de minimisation de la consommation et le contrôle prédictif. Ces stratégies ont été testées et comparées. Les résultats de la simulation ont démontré que le contrôle de la consommation d'hydrogène équivalent donne la consommation de masse d'hydrogène la plus faible. Une stratégie puissante basée sur la logique floue est utilisée pour contrôler l'énergie compte tenu de la dynamique lente des auxiliaires des PàC, de la vitesse du véhicule et du SOC du SC [78]. Dans l'étude [78], la batterie a été utilisée comme source primaire, tandis que la PàC et les SC étaient des sources secondaires. La stratégie a été choisie de telle sorte que lorsque le SOC de la batterie dépasse la valeur de référence, la batterie fournit la majorité de l'énergie tandis que la PàC et le SC fournissent moins d'énergie. Les auteurs dans [79] ont décrit la stratégie de contrôle de la puissance du système hybride à PàC en se basant sur la théorie de contrôle optimal pour répondre à la demande des différentes charges du véhicule tout en optimisant le coût énergétique total et la durée de vie de la batterie. La stratégie proposée est validée en simulation. Les résultats ont montré que le véhicule pouvait atteindre près de 129 km/h (lié à la motorisation). Dans [80], les auteurs ont mentionné que l'efficacité énergétique du VEH peut-être considérablement dégradée lorsque le SOC de la batterie atteint ses limites. Ces paramètres ont été fortement influencés par la pente de la route. Les auteurs ont utilisé la stratégie de gestion de l'énergie fondée sur le contrôle prédictif d'un modèle stochastique en tenant compte de la direction de déplacement et de l'information sur le terrain pour le véhicule. La méthode proposée a permis de maintenir le SOC de la batterie dans ses limites. Cependant, la connaissance préalable du trajet en voiture est nécessaire. Dans [81], les auteurs ont étudié les stratégies de gestion énergétique d'un système hybride composé d'un moteur et d'une batterie. Pour obtenir une répartition de puissance entre ces deux sources, un algorithme génétique a été mis en œuvre et un algorithme d'estimation du SOC modifié a été utilisé

pour optimiser les paramètres et gérer efficacement l'énergie. Les auteurs de [82] ont proposé la stratégie de contrôle en ligne fondée sur un contrôle adaptatif optimal prenant en compte les conditions de fonctionnement de la PàC (température, pression, ...). Ceci, afin de rechercher une amélioration dans la performance de la PàC. Ensuite, l'algorithme d'optimisation fondé sur la théorie de Pontryagin est développé dans le but de trouver le meilleur point de fonctionnement de la PàC. La performance de la stratégie est prouvée par la simulation sur une PEMFC avec différents taux de dégradation [82]. Les travaux de [83] se sont concentrés sur le rôle important des éléments de stockage dans le VEH. Pour cette raison, les auteurs de [83] ont combiné la batterie lithium-ion et le SC comme système de stockage d'énergie avec la PàC comme source primaire. Ils ont discuté du dimensionnement optimal du système de stockage et de la gestion énergétique du système hybride PàC. L'idée principale de ce travail est d'optimiser la longévité de la batterie en introduisant le modèle SOH (state of health) de la batterie. Les auteurs proposent un contrôle de la gestion de l'énergie fondé sur une stratégie de facteurs dynamiques [84], où un système de locomotives à échelle réduite a été envisagé. Le système hybride de [84] se compose d'une PàC à membrane échangeuse de protons (PEMFC) et d'une batterie. La stratégie proposée a été adaptée aux différents cycles de conduite afin de réduire la consommation d'hydrogène et d'améliorer le rendement du système hybride. Les résultats expérimentaux démontrent l'efficacité de la stratégie proposée. Dans [82], la stratégie de contrôle proposée a été adaptée pour protéger la PàC afin de gérer la puissance du système hybride PàC/batterie. Pour cela, le contrôleur classique fondé sur un régulateur PI a été utilisé en combinaison avec les contrôleurs coordonnés courant-tension et courant-tension en cascade [82]. La première approche dans [82] a été utilisée pour suivre la valeur de la tension continue et pour fixer le courant PàC en cas de forte demande de charge. Cependant, l'approche courant-tension en cascade a été développée non seulement pour contrôler la tension continue, mais aussi pour gérer le processus de charge de la batterie dans le cas d'une demande de charge faible. Par conséquent, la gestion de l'énergie a été réalisée et la régulation du courant a été adaptée pour protéger le stack de la PàC. Les auteurs de [85] ont réalisé la distribution de puissance entre les sources utilisées de PàC/batterie/SC en utilisant la technique de division de puissance au moyen d'une décomposition de fréquences. La commande utilisée est conçue de manière à prendre en compte le SOC de la batterie et du SC et la faible dynamique de la PàC. L'efficacité et la robustesse du contrôle proposé sont confirmées par les résultats obtenus. Dans le travail de [86], le système hybride à haute puissance a été étudié et est composé de deux PEMFC, de deux batteries et de deux SC pour les tramways. Pour partager la puissance élevée entre les sources du système de propulsion hybride, la combinaison de deux méthodes de gestion de l'énergie est proposée, à savoir le contrôle adaptatif et la stratégie de minimisation de la consommation équivalente (ECMS). Le cycle de conduite réel est utilisé pour évaluer

le contrôle proposé en plate-forme expérimentale. A partir des résultats obtenus, les contrôleurs proposés ont atteint les objectifs de l'étude. De plus, grâce à la commande adaptative, les courants sont limités. Cependant, la technique Stratégie de Minimisation de la Consommation Equivalente (ECMS) a permis d'optimiser la consommation d'hydrogène et de garantir des conditions de fonctionnement sûres, donc l'autonomie du système hybride. Les auteurs de l'article de [23] ont étudié le contrôle du système d'auto convergence pour la gestion de l'énergie du tramway électrique hybride qui coordonne les multi-sources à savoir le système PàC, les batteries et les SCs. La tâche de la commande utilisée est de coordonner la puissance demandée à chaque source de manière appropriée et de garantir l'état de charge (SOC) des dispositifs de stockage à un niveau acceptable. Pour valider la rationalité du contrôle proposé, la comparaison avec d'autres stratégies de contrôle est suggérée. Un autre travail sur la gestion de l'énergie proposé par [87] est réalisé sous la forme d'une structure de contrôle à deux niveaux. L'un est fondé sur le contrôleur PI et porte sur la boucle de régulation interne pour les courants PàC/SC et la tension du bus DC. Le deuxième niveau est fondé sur la Stratégie ECMS afin de réguler la puissance de la PàC en considérant la minimisation de la consommation d'hydrogène. Les stratégies proposées ne fournissent pas la preuve de stabilité et la validation en temps réel. Les auteurs de [88] ont proposé d'étudier le système hybride composé de la PàC et le SC. La stratégie considérée de gestion de l'énergie combine le contrôle optimal et un modèle au cycle de la chaîne de Markov pour prédire la puissance requise. Deux contraintes dans des conditions de conduite extrêmes sont prises en compte, à savoir la puissance élevée et la vitesse élevée. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'importance d'ajouter un modèle de Markov pour limiter le problème de la réponse dynamique lente de la PàC et pour maintenir l'état de charge du SC. La gestion de l'énergie proposée pour le système PàC/SC dans [89] est basée sur une technique de distribution de fréquence. Les auteurs ont mis en œuvre les données expérimentales des paramètres de la PàC et SOC du SC pour émuler le comportement réel des sources utilisées. Une gestion dynamique de l'énergie nécessaire entre la PàC et SC est réalisée en faisant fonctionner les sources à leurs meilleurs points de fonctionnement. Les auteurs de [90] ont proposé d'utiliser la logique floue pour gérer l'énergie entre la PàC, la batterie et la charge électrique pour les applications de véhicules aériens sans pilote. La nouveauté du contrôleur proposé dans [90] a consisté à utiliser la plus grande partie de l'énergie de la batterie et à minimiser la consommation d'hydrogène de la PàC. Les résultats expérimentaux obtenus dans [90] ont permis d'établir l'efficacité de la stratégie de la logique floue en ligne qui garantit une puissance instantanée élevée à tout moment et une consommation d'hydrogène importante, tout en maintenant le SOC de la batterie à son état normal. Dans [91], la conception de la gestion de l'énergie en ligne est mise en évidence pour le système hybride PàC en utilisant deux contrôleurs combinés, à savoir, un modèle dynamique et des réseaux neuronaux. Les régulateurs utilisés dans [91] ont été

testés sur huit cycles de conduite. De plus, la méthode d'optimisation fondée sur le gradient est utilisée dans [91] pour minimiser la consommation d'hydrogène sur différents cycles de conduite. Les résultats de la simulation ont montré les performances de la régulation optimale proposée pour différents cycles de conduite avec une minimisation de la consommation d'énergie équivalente. Les travaux de la Référence [65] ont permis un découplage en fréquence des puissances en temps réel afin de réduire le stress pour la PàC. Des performances similaires ont également été obtenues par une combinaison de contrôle par platitude, de régulateur de DP et de gestion de l'énergie à partir de règles logiques floues [92]. La principale contribution de ce dernier travail est la mise en œuvre et la validation en temps réel des contrôles par platitude et logique floue pour la régulation de la tension du bus DC.

Toutefois, la plupart de ces propositions n'ont été évaluées qu'en simulation. De plus, tous les composants du véhicule ont des comportements non linéaires. Ces contraintes affectent la stabilité du système. Avec les méthodes du contrôle classique, le système hybride du véhicule électrique est bien géré, mais ils n'assurent pas la stabilité du système hybride, surtout en cas de phénomène de saturation [9]. Il est bien établi que les comportements non linéaires affectent la stabilité du système [93]. L'instabilité peut causer des pertes d'énergie et des dommages potentiels sur le véhicule. Autrement dit, le concepteur de la commande a le choix de considérer la non linéarité du système étudié sur une plage de fonctionnement particulière. Les interactions et les non linéarités affectent la stabilité de l'ensemble du système, ce qui peut générer des pertes d'énergie et potentiellement endommager le véhicule. Un autre critère important est que le contrôle développé doit pouvoir être implémenté en temps réel. Parmi les méthodes qui résolvent ces problèmes, on cite la méthode de contrôle utilisée dans ce travail de thèse, qui est le contrôle fondé sur la passivité. Cette approche assure le contrôle et le suivi de l'énergie de chaque source à sa référence tout en garantissant la stabilité de la fonction énergétique globale (fonction de Lyapunov) dont le minimum est à l'équilibre souhaité [94]–[96].

Le but du contrôle fondé sur la passivité est de contrôler le système en rendant passif le système en boucle fermée [97]. Le système passif est un système dans lequel l'énergie stockée ne peut pas dépasser l'énergie fournie, la différence étant dissipée [97]. D'après les travaux de [86],[87], l'approche IDA-PBC est considérée comme une méthode intéressante pour résoudre le problème de la passivité et de la stabilité, qui est un moyen général de stabiliser une grande classe de systèmes physiques et a l'avantage d'être utilisée pour le contrôle dans différents domaines. Par conséquent, le contrôle par passivité a démontré sa capacité à garantir des performances accrues avec une mise en œuvre simple en temps réel [100], [101]. Le succès de la stratégie choisie par rapport aux stratégies classiques repose

principalement sur son adaptation aux systèmes non linéaires comme les systèmes linéaires ainsi que sur la garantie de la stabilité du système.

Les auteurs de [60] se sont concentrés sur la stratégie de gestion de l'énergie d'un système hybride PàC/SC au moyen d'une commande l'IDA-PBC. Le modèle global étudié dans [60] était d'un ordre trois. Dans ce travail, cinq scénarios ont été proposés en fonction de l'état de charge du SC, de la consommation d'hydrogène et du mode de freinage. La validation du contrôle proposé a été évaluée dans l'environnement Matlab/Simulink. Dans [60], la stratégie de contrôle étudiée pour le système hybride PàC/SC est fondée sur l'IDA-PBC. La conception de la commande a pour objectif de réguler la tension de la PàC pour suivre la tension du bus DC et de contrôler la charge/décharge du SC. Dans le travail de [60], la structure de la stratégie de contrôle est composée de trois sous-systèmes, à savoir : deux régulateurs de boucles de courant interne pour la PàC et SC basés sur des régulateurs PI, où les paramètres de rapport cyclique sont les sorties. Le troisième sous-système est la boucle externe fondée sur IDA-PBC pour contrôler la tension du bus DC et le SOC du SC. Un autre travail s'est concentré sur la gestion de l'énergie du système hybride PàC/SC en utilisant l'algorithme de contrôle de platitude [102]. Le principe de la méthode utilisée est fondé sur la connaissance des trajectoires de la variable de sortie plate pour obtenir les trajectoires de la variable d'état et de contrôle [102]. Dans la [103], la batterie est utilisée avec une PàC afin d'éviter les dommages électrochimiques et thermiques causés par des changements brusques de la charge. L'étude consiste à contrôler le système hybride par l'intermédiaire des convertisseurs connectés au PàC et à la batterie. Afin de maintenir constante l'énergie délivrée par la PàC, la puissance transitoire est fournie par la batterie. Le contrôle de la tension du bus DC a été effectué en utilisant l'approche IDA-PBC. Deux variables mesurées étaient nécessaires, le courant de la batterie et la tension PàC. La méthode a été conçue pour les systèmes décrits par un modèle PCH. L'un des avantages de l'utilisation des modèles PCH est de couvrir un large éventail de systèmes physiques et de saisir d'importantes propriétés structurelles [104]. Dans ce travail [104], le système hybride étudié est une PàC et un SC pour des applications dynamiques de haute puissance. Dans ce cas, l'approche IDA-PBC est utilisée pour démontrer la stabilité globale et les limites du système tout en réduisant le stress sur la PàC dans les phases de transitoires. Dans [105], les auteurs ont appliqué la stratégie IDA-PBC pour le système PàC et un SC. La loi de contrôle fondée sur la passivité assure la stabilité asymptotique du système hybride choisi.

2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif global de ce travail de thèse est présenté qui réside en gestion d'énergie des systèmes hybrides à PàC. En raison des limitations de la dynamique des PàC et afin d'obtenir un système performant, l'hybridation de la PàC avec un système de stockage simple et/ou hybride est

proposée dans ce travail de recherche. Pour cela, les différentes unités constituant les systèmes hybrides sont étudiées séparément en termes de leur principe de fonctionnement, les technologies existantes, les modèles choisis ainsi que les avantages et inconvénients. Dans ce travail, la PàC est considérée comme une source d'énergie principale et la batterie et/ou les SCs sont /ou est considéré(s) comme le système de stockage. Par la suite, le processus d'hybridation est présenté, ainsi que les différents points clés permettant de comprendre le principe de l'hybridation, et la nécessité de développer une stratégie de contrôle de puissance. Un état de l'art des travaux sur les stratégies de gestion d'énergie appliquées pour les systèmes hybride à PàC est présenté en se focalisant sur la stratégie de contrôle fondé sur la passivité, qui est la méthode choisie dans ce travail de thèse pour le contrôle de la puissance pour les sources hybrides étudiées.

Chapitre 3 :
Modélisation de structures hybrides

3 Modélisation de structures hybrides

3.1 Introduction

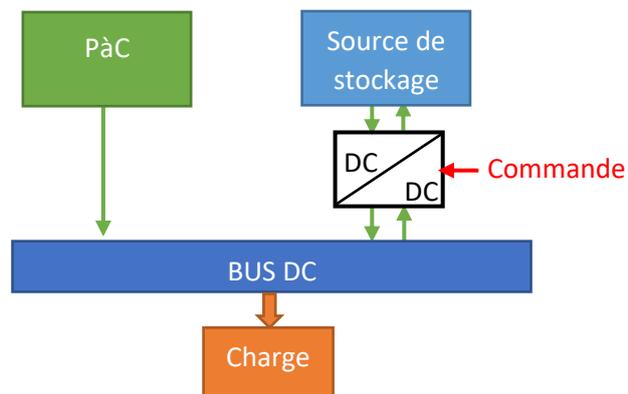
Les piles à combustible produisent de l'énergie électrique à partir d'une réaction électrochimique entre un gaz combustible riche en hydrogène et un oxydant (comme cité dans le chapitre 2). Ce sont des sources à courant fort et à basse tension [106]. L'utilisation de la PàC dans les applications embarquées est devenue intéressante pour les véhicules électriques lors de l'utilisation d'éléments de stockage, comme les batteries à haute énergie spécifique, et/ou les SCs à haute puissance spécifique [107]. Dans les systèmes embarqués, la source d'alimentation principale qui peuvent être les PàCs ou les batteries, doit produire la puissance moyenne pour assurer l'autonomie du système [108]. Dans les phases transitoires, les sources de puissance produisent la puissance manquante lors de l'accélération, et absorbent les pics de puissance [58]. Les PàCs ont une grande constante de temps pour répondre à une augmentation ou une diminution de la demande en puissance [109]. La limitation dynamique de ces systèmes est principalement due aux auxiliaires [109]. Les SCs sont dimensionnés pour la puissance charge en pointe requise et sont utilisés dans les régimes transitoires de courte durée tels que l'accélération et le freinage [55]. Ces événements de courte durée sont répétés plusieurs fois durant le fonctionnement de la source d'énergie hybride et nécessitent relativement peu d'énergie mais des profils avec beaucoup de cycles [110]. Dans ce chapitre, le choix des systèmes multisources multi convertisseurs s'est porté sur trois configurations différentes pour lesquelles nous présentons leur modélisation et qui sont :

- PàC/batterie
- PàC/SC
- PàC/batterie/SC

Dans les topologies des systèmes hybrides dédiées pour les véhicules électriques à base de PàC, il existe trois organes principaux dans la chaîne de traction du système PàC, le dispositif de stockage et la charge. Ces trois sources sont nécessairement connectées directement ou indirectement au bus DC [111]. Pour cela, trois architectures principales sont présentées :

- Architecture 1: PàC → Bus DC

Source de stockage → Convertisseur → Bus DC

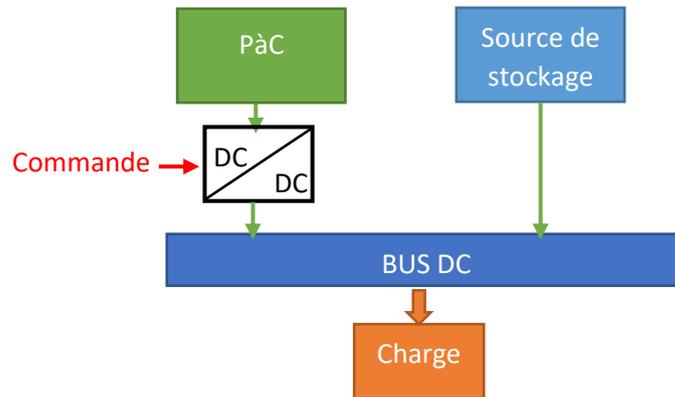


Dans cette architecture, le système PàC impose sa tension au bus DC. Le convertisseur lié à la source de stockage est un buck / boost réversible en courant.

- Architecture 2: PàC → Convertisseur → Bus DC

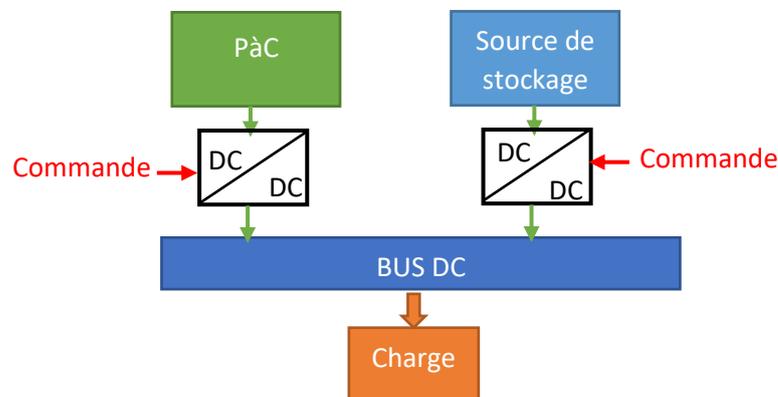
Source de stockage → Bus DC

Pour le deuxième cas, la PàC est connectée au bus DC via le convertisseur Boost unidirectionnel et le système de stockage est lié directement au bus DC. Donc c'est la source secondaire qui impose sa tension au bus.



- Architecture 3 : PàC → Convertisseur → Bus DC
Source de stockage → Convertisseur → Bus DC

Le système PàC et la source de stockage sont connectés au bus DC via un convertisseur Boost et un convertisseur Buck / Boost, respectivement. Dans cette architecture, la tension du bus DC est librement choisie dans la plage de fonctionnement des convertisseurs [112].



Les avantages des architectures 1 et 2, où un seul convertisseur est utilisé, est la réduction de pertes liées au convertisseur, la simplicité de le commander puisqu'il y'a un seul degré de liberté et le faible coût de l'installation avec moins d'encombrement [113]. Cependant, cette topologie présente un risque de sécurité due au fait que la source connectée directement au bus DC n'est pas limitée en courant [113].

En revanche, l'architecture 3 permet de palier le problème au sécurité de l'installation et elle s'adapte à tous niveau de tension et de courant [114]. Dans ce travail de thèse, l'architecture 3 est retenue pour la suite de notre travail.

Pour toutes les architectures présentées dans ce chapitre, les principaux objectifs communs sont :

- Contrôler le système hybride en utilisant la méthode de passivité.
- Maintenir une énergie moyenne constante délivrée par la PàC.
- Les SCs assurent les transitoires de puissance. Lorsque l'architecture est composée d'une batterie, cette dernière peut être utilisée dans les phases transitoires et/ou permanentes afin que le système hybride complet satisfasse la demande en énergie de la charge le long du parcours.

La première étape importante est la représentation mathématique du système de traction sous forme d'équations d'état. Cette représentation mathématique permet d'exprimer le comportement du système en fonction des états initiaux et des signaux d'entrées [115]. En outre, ces équations d'état sont des équations différentielles du premier ordre composées de variables d'états, de variables de commande, des entrées et sorties locales du système [116]. Cette étape nécessite la connaissance du système étudié afin de concevoir une représentation mathématique bien structurée sous forme de boucles énergétiques imbriquées qui met en avant les connexions entre les différents composants de la chaîne de traction énergétique [117]. La stratégie de contrôle choisie devra alors prendre en considération les contraintes liées à ces connexions.

Une représentation systématique de chaque source hybride a été modélisée dans l'environnement Matlab/Simulink sous forme de blocs d'entrée, de sortie, tandis que les équations de modèle sont définies dans des scripts.

Après la modélisation du système, les points d'équilibre sont calculés afin d'assurer le comportement souhaité. Lorsque l'état d'équilibre est atteint, la charge doit être alimentée uniquement par la PàC ou éventuellement aidée par la batterie. Le contrôle choisi doit maintenir la tension de bus DC à une valeur constante. Pendant les transitoires, la puissance fournie par la source de courant continu (PàC) doit être la plus constante possible (sans pics de puissance significatifs), de sorte que les sources auxiliaires délivrent la puissance transitoire à la charge. La PàC peut aussi charger la batterie et/ou le SC. Il est important de noter que l'option du dimensionnement n'est pas considérée dans cette thèse, vu que le but est la gestion d'énergie d'un système hybride supposé pré-dimensionné.

3.2 Modélisation Piles à combustible + batteries

La batterie peut être modélisée comme un circuit équivalent tel qu'une source de tension et une résistance interne. Parce que, la PàC et la batterie ont des avantages et des inconvénients qui leur sont propres, l'hybridation de ces deux sources présente un avantage en terme de complémentarité, une puissance constante fournie par le système PàC tandis que la batterie fournit les petites puissances de pointe rencontrées lors des accélérations rapides et du freinage [3], [5],[11]. La batterie peut remplir deux fonctions principales dans un système hybride PàC/batterie: (i) la fonction "source d'énergie", puisque les batteries sont des accumulateurs électrochimiques, (ii) la fonction "source de puissance", pour laquelle la batterie vient en complément de la source principale (PàC) (ou toute autre source limitée en puissance) [56], [57], [111], [118], [119]. Dans cette section, la sollicitation de la batterie pourra intervenir dans les phases transitoires et/ou dans les phases permanentes.

La structure de la source hybride PàC/batterie étudiée est décrite dans la sous-section suivante :

3.2.1 Architecture avec deux convertisseurs

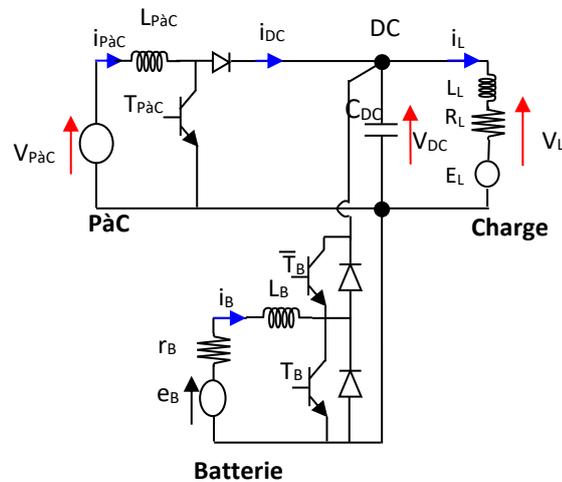


Fig.3.1 Architecture de la source hybride PàC/Batterie

Le circuit de la source hybride PàC/batterie montré dans la Fig.3.1 est composé :

- D'un bus DC de nature capacitive qui permet d'alimenter la charge suivant la tension constante désignée par V_{DC} qui est à son tour une variable à contrôler.
- D'une PàC protégée par une diode antiretour du convertisseur boost et connectée au bus continu via un convertisseur élévateur non réversible afin d'augmenter la tension de sortie de la PàC pour alimenter la charge.
- D'une batterie modélisée par une f.e.m en série avec une résistance interne. Elle est connectée au bus continu via un convertisseur élévateur/abaisseur bidirectionnel en courant.
- Des bobines de lissage pour chaque source². Ces bobines existent dans les convertisseurs et ne sont donc pas ajoutées.
- D'une charge qui est modélisée par une force électromotrice (F.E.M) en série avec une résistance interne et une inductance. Ce qui correspond au schéma électrique d'un M.C.C et qui autorise le freinage récupératif.

Pour le convertisseur de la PàC, deux états³ sont possibles selon l'interrupteur de la PàC $T_{PàC}$, ce qui est montré dans les schémas équivalents suivants :

² Pour toutes les topologies, nous supposons que les interrupteurs des convertisseurs sont idéaux et les inductances sont sans pertes.

³ Afin d'alléger le manuscrit, cette définition ne sera pas répétée pour le reste des structures.

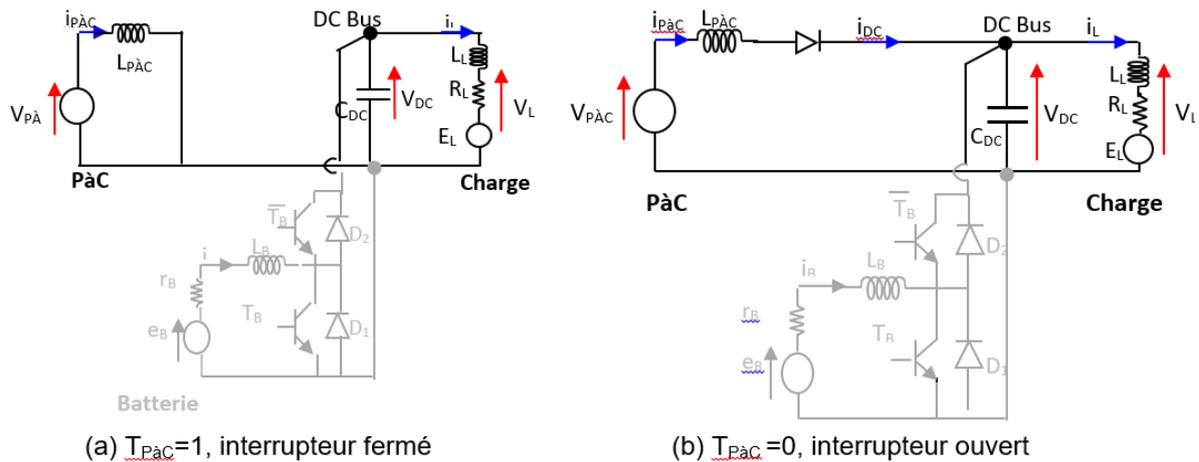


Fig. 3.2 Schémas équivalents du convertisseur de la PàC en mode de conduction continue [120]

Un couplage parallèle est choisi pour toutes les topologies étudiées dans ce travail de thèse et qui permet une distribution de la puissance entre les sources et le système de traction. Cette architecture permet d'avoir un nœud de puissance où s'additionnent les puissances des sources et dont la valeur de la tension du bus est commune [121]. Donc ce couplage peut être exprimé en puissance pour un système PàC/batterie avec la relation suivante :

$$P_{FC} + P_B = P_L \quad 3.1$$

Comme la montre la Fig. 3.1, le système hybride PàC/batterie comprend un bus DC alimentée par une PàC et un convertisseur élévateur DC/DC non réversible, qui maintient la tension de bus à sa valeur de référence (V_d) et une batterie qui est reliée au bus continu par un convertisseur DC/DC abaisseur/élévateur réversible en courant. Le rôle de la PàC est de fournir la puissance moyenne à la charge. Tandis que la batterie peut en même temps compenser la puissance de la charge dans les phases permanentes et peut servir comme source de puissance pour alimenter la charge dans les phases transitoires.

L'association de la PàC avec la batterie avec deux convertisseurs selon la topologie parallèle présente l'avantage de fonctionner avec une seule source en cas de défaillance de l'autre, elle permet donc un fonctionnement en mode continu du système complet [122]. De plus, la distribution de la puissance entre les deux sources permet de fonctionner de façon indépendante [123].

Les principaux objectifs de l'étude proposée, sont :

- Maintenir une énergie moyenne constante délivrée par la PàC, sans des pics de puissance significatifs.
- S'assurer que la puissance transitoire est fournie par le système de stockage (batterie).
- Maintenir constante la tension du bus continu à travers le contrôle des deux convertisseurs.
- Solliciter la batterie pour l'alimentation de la charge quand la PàC ne peut pas le faire seule.
- Après la modélisation, des points d'équilibre sont calculés afin d'assurer le comportement souhaité du système.

3.2.2 Equations du système

Le système global de la structure PàC/batterie est écrit sous forme d'équations d'état en appliquant les lois de Kirchoff sur les différents états commutés du circuit de la Fig.3.1.

3.2.2.1 Modélisation du convertisseur de la PàC

La source PàC fournit un courant continu à basse tension. Elle est connectée au bus DC par un convertisseur DC/DC élévateur qui est utilisé pour adapter la faible tension délivrée par la PàC et pour réduire l'ondulation du courant d'entrée. La tension et le courant de la PàC s'écrivent comme suit :

$$\frac{di_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{PàC} - (1 - \mu_{FC})V_{DC}] \quad 3.2$$

Où V_{FC} est donnée par le modèle statique non-linéaire de Larminie et Dicks⁴, comme suit :

$$V_{FC} = E_0 - A \log\left(\frac{i_{FC} - i_n}{i_0}\right) - \left[R_m(i_{FC} - i_n) + B \log\left(1 - \frac{i_{FC} - i_n}{i_{lim}}\right) \right] \quad 3.3$$

Ainsi $V_{FC} = f(i_{FC})$, où E_0 est la tension mesurée à circuit ouvert, i_{FC} est le courant de sortie de la PàC, i_0 est le courant d'échange, A est la pente de la droite de Tafel, i_{lim} est le courant limite, B est une constante de transfert de masse, i_n est le courant interne et R_m est la résistance de la membrane et de contact.

Selon les schémas équivalents du convertisseur de la PàC, si l'interrupteur $T_{PàC}$ est fermé ($u_{PàC} = 1$), dans ce cas une énergie est stockée dans l'inductance $L_{PàC}$. Cependant, si $T_{PàC}$ est ouvert ($u_{PàC} = 0$), l'énergie emmagasinée est transférée au bus DC, dans ce cas la tension de bus est donnée comme suit :

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC}} [(1 - \mu_{FC})i_{FC} - i_L + (1 - \mu_B)i_B] \quad 3.4$$

II.1.2.2 Modélisation du convertisseur de la batterie

La batterie est connectée au bus DC à travers le convertisseur bidirectionnel DC/DC, comme montre la Fig.11.1. La tension et le courant de la batterie sont exprimés comme suit :

$$V_B = e_B - r_B i_B \quad 3.5$$

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_B} (e_B - r_B i_B - (1 - \mu_B)V_{DC})$$

Le courant de la batterie est exprimé en fonction de son SoC (voir Chapitre 4).

Aussi, le courant et la tension de la charge sont définis comme suit :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_L} [-E_L - R_L i_L + V_{DC}] \quad 3.6$$

$$V_L = V_{DC}$$

3.2.2.2 Modélisation globale du système

En choisissant le vecteur d'état comme suit :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [i_{FC}, V_{DC}, i_B, i_L]^T$$

Avec

⁴ Le modèle statique non-linéaire de Larminie et Dicks est utilisé pour toutes les configurations étudiées

i_{FC} Courant de la PàC, V_{DC} Tension du bus continu, i_B Courant de la batterie, i_L Courant de la charge. Les équations dynamiques englobant les équations (3.2 au 3.6) du système de puissance montré dans la Fig.3.1 sont données par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{PaC} - (1 - \mu_{FC})x_2] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C_{DC}} [(1 - \mu_{FC})x_1 - i_L + (1 - \mu_B)x_3] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{L_B} (e_B - r_B x_3 - (1 - \mu_B)x_2) \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_L} [-E_L - R_L x_4 + x_2] \end{cases} \quad 3.7$$

Avec $u_i = [1 - \mu_{FC}, 1 - \mu_B]^T$ sont les signaux du contrôle. V_{FC} Est considérée comme une perturbation mesurable.

3.3 Modélisation PàC + SCs

La dynamique lente de la PàC peut être compensée par une dynamique plus rapide des sources de stockage [110]. Contrairement aux batteries, les SC ont une densité d'énergie plus faible mais une densité de puissance plus élevée et fournissent des cycles de charge/décharge de courant très rapides en raison de leur faible résistance équivalente en série [12]. Les SCs peuvent fournir plus de cycles que les batteries et sont bien adaptés à des cycles dynamiques très élevés.

La Fig.3.3 montre le système multi sources étudié composé d'une source hybride PàC/SC. Cette hybridation de la PàC avec un SC est une solution courante utilisée dans la technologie automobile [124]. L'interconnexion de la source d'énergie, source de stockage et la charge électrique est réalisée par les convertisseurs connectés au bus DC continu [88]. Dans cette étude, la PàC est modélisée par sa caractéristique statique, c'est-à-dire la tension aux bornes est obtenue par le courant demandé selon la courbe de polarisation. Pour des raisons de simplification, le SC peut être modélisé par un simple condensateur de forte puissance (valeur élevée de sa capacité).

II.2.1 Architecture avec deux convertisseurs

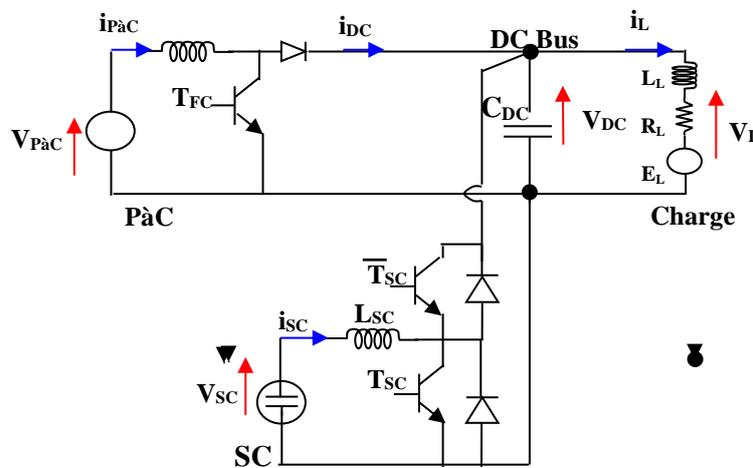


Fig.3.3 Structure hybride PàC/SC

3.3.1 Equations du système

Le système global de la structure PàC/SC est écrit sous forme d'équations d'état en appliquant les lois de Kirchhoff sur les différents états commutés du circuit de la Fig.3.3.

3.3.1.1 Modélisation du convertisseur de la PàC

Comme dans le système PàC/batterie, les équations de la PàC avec son convertisseur sont données comme suit :

$$\frac{di_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{PàC} - (1 - \mu_{FC})V_{DC}] \quad 3.8$$

3.3.1.2 Modélisation du convertisseur élévateur/abaisseur du SC

$$\begin{aligned} \frac{di_{SC}}{dt} &= \frac{1}{L_{SC}} [V_{SC} - (1 - \mu_{SC})V_{DC}] \\ \frac{dV_{SC}}{dt} &= \frac{-1}{C_{SC}} i_{SC} \end{aligned} \quad 3.9$$

Ainsi que le courant de la charge sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L_L} [-E_L - R_L i_L + V_{DC}] \\ V_L &= V_{DC} \end{aligned} \quad 3.10$$

3.3.1.3 Modélisation du système globale

Le vecteur de l'espace d'état est choisi comme suit :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = [i_{FC}, V_{DC}, i_{SC}, V_{SC}, i_L]^T$$

Avec

- $i_{FC}, V_{PàC}$: sont le courant et la tension de la PàC, respectivement ;
- i_{SC}, V_{SC} : sont le courant et la tension du SC, respectivement ;
- i_L, V_{DC} : sont le courant et la charge et la tension de bus continu, respectivement ;

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{L_{FC}} [V_{PàC} - (1 - \mu_{FC})x_2] \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C_{DC}} [(1 - \mu_{FC})x_1 - x_5 + (1 - \mu_{SC})x_3] \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L_{SC}} [x_4 - (1 - \mu_{SC})x_2] \\ \dot{x}_4 &= -\frac{1}{C_{SC}} x_3 \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{L_L} [x_2 - R_L x_5 - E_L] \end{aligned} \right. \quad 3.11$$

Puisque le SC doit compenser la dynamique lente de la PàC, il alimente la charge uniquement durant les demandes en puissance élevées, donc la tension considérée du SC est sa tension nominale.

3.4 Modélisation Piles à combustibles + batteries + SCs

L'hybridation de la PàC avec d'autres sources de stockage permet de sous-dimensionner la PàC et d'augmenter sa durée de vie et la disponibilité du véhicule électrique le long du trajet. En effet, d'après la littérature, la structure PàC/SC présente de meilleures performances que la structure hybride PàC/batterie, du fait que le SC répond de manière la plus efficace à la demande de charge dans les phases transitoires [125]. Cependant, le problème qui se pose pour cette hybridation réside au démarrage où la PàC aurait besoin de temps pour le démarrage (température de fonctionnement) [14][22]. L'utilisation des SCs comme système de stockage dans des sources hybride avec PàC ou batteries, permet d'absorber les pics de puissances et peut compenser les limitations intrinsèques de la source principale grâce à leurs caractéristiques appropriées comme dispositif de puissance [126]. Les PàCs fonctionnent tant qu'elles sont alimentées en carburant. De plus, elles ont une grande constante de temps pour répondre à une augmentation ou à une diminution de la demande de puissance de sortie (principalement à cause de ses auxiliaires) [57]. Dans ce cas, seules les batteries grâce à leur énergie spécifique comparable à celle de la PàC peuvent prendre en charge le démarrage du système et alimentent les auxiliaires de la PàC [127][128]. En outre, un véhicule à PàC, utilisant un système de stockage d'énergie combiné entre batterie et SC, peut fournir une excellente économie de carburant et d'excellentes performances tout en prolongeant la durée de vie de la batterie et de la PàC grâce à une utilisation plus fréquente du SC [20][23], [126]. Les PàC sont semblables aux batteries puisqu'elles produisent toutes les deux une tension continue en utilisant un procédé électrochimique. Cependant, la PàC, grâce à la densité d'énergie de l'hydrogène, procure une autonomie beaucoup plus grande que celle de la batterie.

Dans le présent travail, les trois sources sont combinées, où la PàC est la source principale ; la batterie et le SC sont des auxiliaires secondaires. La structure générale du système est illustrée dans la Fig.3.4. Cette structure consiste à connecter chaque source à un convertisseur DC/DC. L'intérêt des convertisseurs est l'adaptation des paramètres électriques (tension/courant) entre la source et la charge [129]. La régulation de chaque convertisseur permet d'ajuster le partage de la puissance entre les sources. Le convertisseur de la PàC est unidirectionnel et consiste en un amplificateur de tension. Les autres convertisseurs qui sont dédiés au SC et à la batterie sont bidirectionnels en courant (donc puissance) et sont des hacheurs abaisseur/élevateur (Buck/boost) de tension en fonction du mode de fonctionnement (récupération/alimentation en énergie) [122]. Du point de vue du contrôle, cette structure est intéressante car elle permet un contrôle total de tous les composants en termes de distribution rapide de la puissance de la charge, de l'état de charge des sources de stockage et de la régulation de la tension fournie à la charge [58]. La batterie est modélisée par un modèle linéaire simple qui prend en compte sa résistance interne et la force électromotrice. Le SC est modélisé par un condensateur de valeur importante. La charge est modélisée par le circuit série ERL (fem, résistance et inductance) ce qui correspond aux schéma équivalent électrique d'un moteur DC.

Dans cette sous-section, deux configurations d'ordres différents sont abordées.

3.4.1 Système d'ordre 8 : Architecture avec trois convertisseurs

Dans cette étude, un système d'ordre 8 est présenté avec un défaut supposé au niveau de la PàC. Le comportement électrique de la PàC en présence de ce défaut est défini par une chute de tension et de puissance à la sortie de la pile.

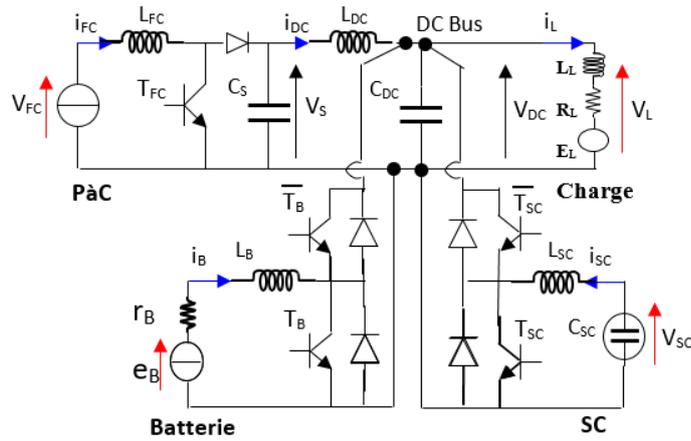


Fig.3.4 Structure hybride PàC/Batterie/SC d'ordre 8

3.4.1.1 Equations du système

3.4.1.1.1 Modélisation du convertisseur élévateur de la PàC

$$\begin{aligned} \frac{dV_s}{dt} &= \frac{1}{C_s} [(1 - \mu_{FC})i_{FC} - i_{DC}] \\ \frac{di_{FC}}{dt} &= \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - \mu_{FC})V_s] \end{aligned} \quad 3.12$$

V_{FC} est donnée par (3.3) et est considérée comme une perturbation mesurée, et d'un point de vue physique, il vient que $V_{FC} \in [0, V_d]$ en raison du convertisseur élévateur de la PàC.

3.4.1.1.2 Modélisation du convertisseur de la batterie

$$\begin{aligned} V_B &= e_B - r_B i_B \\ \frac{di_B}{dt} &= \frac{1}{L_B} [V_B - (1 - \mu_B)V_{DC}] \end{aligned} \quad 3.13$$

3.4.1.1.3 Modélisation du convertisseur du SC

$$\begin{aligned} \frac{dV_{SC}}{dt} &= \frac{-1}{C_{SC}} i_{SC} \\ \frac{di_{SC}}{dt} &= \frac{1}{L_{SC}} [V_{SC} - (1 - \mu_{SC})V_{DC}] \end{aligned} \quad 3.14$$

Le courant et la tension de la charge sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} V_L &= V_{DC} \\ \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L_L} [-E - R_L i_L + V_L] \end{aligned} \quad 3.15$$

II.3.1.4 Modélisation du système globale :

Le modèle étudié est un système d'équations d'ordre 8 et donné comme suit :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T = [V_s, i_{FC}, V_{DC}, i_{DC}, V_{SC}, i_{SC}, i_B, i_L]^T$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \frac{1}{C_S} [(1 - \mu_{FC})x_2 - x_4] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - \mu_{FC})x_1] \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{C_{DC}} (x_4 - x_8 + (1 - \mu_{SC})x_6) \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{L_{DC}} [x_1 - x_3] \\ \dot{x}_5 = \frac{-1}{C_{SC}} x_6 \\ \dot{x}_6 = \frac{1}{L_{SC}} [x_5 - (1 - \mu_{SC})x_3] \\ \dot{x}_7 = \frac{1}{L_B} [V_B - (1 - \mu_B)x_3] \\ \dot{x}_8 = \frac{1}{L_L} [-E - R_L x_8 + x_3] \end{array} \right. \quad 3.16$$

Dans une seconde étape, un défaut au niveau de la PàC est supposé dans les simulations. Le comportement électrique de la PàC en présence de ce défaut est défini par une chute de tension et de la puissance à la sortie de la PàC.

Dans ce cas, la puissance demandée par la charge doit être satisfaite même en présence de défaut. Le défaut considéré cause la réduction de la puissance de la PàC et par conséquent son courant qui est définie par l'équation suivant :

$$I_{FC-refault}^{ref} = (1 - \alpha) * \frac{P_{FC}}{V_{FC}} \quad 3.17$$

Avec P_{FC} : puissance de la PàC et α : présente le taux de défaut qui peut prendre des valeurs comprises dans l'intervalle $[0,1]$. Si la PàC est défaillante, son courant de référence diminue selon le pourcentage de défaillance (c.-à-d. selon la valeur de α). De plus, si la PàC est entièrement endommagée, $\alpha = 1$ pas de courant demandé à la PàC. En effet, la quantité de la puissance manquante doit être compensée par la batterie dans les phases permanentes et par la batterie et le SC dans les phases de transitions. Dans tous les cas, l'égalité suivante doit être satisfaite :

$$P_{FC} + P_B + P_{SC} = P_{Load} \quad 3.18$$

Il est à noter que nous nous intéressons dans ce travail de thèse à proposer une commande tolérante au défaut dans la PàC ou dans son convertisseur. Ce défaut se manifeste par une chute de la puissance en sortie de la PàC. Ainsi, ce pourcentage de défaut est représenté par le scalaire α . Les méthodes de diagnostic et de détermination d'un défaut ne sont pas traitées ici et ont fait l'objet de plusieurs publications.

Etant donné que dans notre structure, la tension V_{FC} et le courant I_{FC} de la PàC sont mesurés, la puissance de la PàC est donc disponible. De la même manière, la puissance de la charge est connue à chaque instant. Une comparaison, en régime permanent, de la puissance de la charge et de celle de la batterie (qui doivent être identiques à l'équilibre) permet de détecter une défaillance au niveau de la production de la PàC. Dans ce cas, α est calculée comme étant le pourcentage de cette défaillance. L'activation de α permet de réduire les sollicitations sur le courant de la PàC à travers le courant de référence I_{FC} donnée par 3.17 et la mise à contribution de la batterie à travers (voir 4.43)

3.4.2 Système d'ordre 6 : Architecture avec trois convertisseurs

Afin de simplifier, une autre structure de la source hybride PàC/batterie/SC est proposée permettant une simplification de la structure Fig.3.4 présentée Fig.3.5.

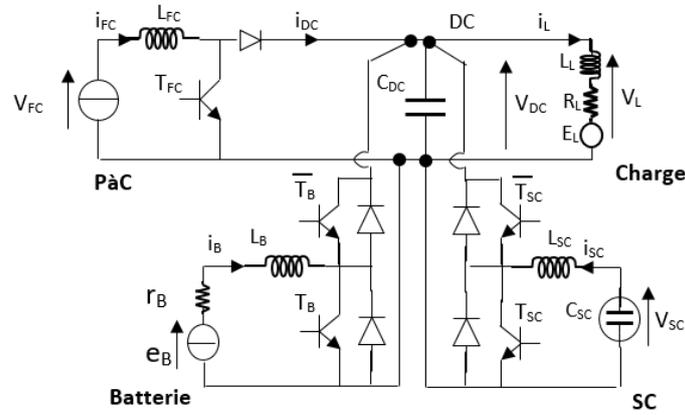


Fig.3.5 Structure hybride PàC/Batterie/SC d'ordre 6

Pour cette structure, le système est de l'ordre 6 au lieu de 8. Le vecteur des variables d'état est défini comme suit :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [i_{FC}, V_{DC}, i_{SC}, V_{SC}, i_B, i_L]^T$$

Dans plusieurs applications, il est à noter que l'inductance L_{DC} du bus continu est très faible ou souvent négligée. Si on décide de négliger cette inductance on économise une variable d'état (i_{DC}). De plus, les capacités C_S et C_{DC} deviennent en parallèle. Aussi, une capacité équivalente à la mise en parallèle de C_S et C_{DC} permet également d'économiser une variable d'état V_S .

Donc, la représentation de l'espace d'état du système de traction est donnée par les équations suivantes :

3.4.2.1 Equations du système

3.4.2.1.1 Modélisation du convertisseur de la PàC

$$\frac{di_{FC}}{dt} = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - (1 - \mu_{FC})x_2] \quad 3.19$$

V_{FC} Donnée par Eq 3.3 est considérée comme une perturbation mesurée, et d'un point de vue physique, il vient que $V_{FC} \in [0, V_d]$.

3.4.2.1.2 Modélisation du bus DC

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC}} [\mu_1 x_1 - x_6 + \mu_2 x_3 + \mu_3 x_5] \quad 3.20$$

3.4.2.1.3 Modélisation du convertisseur élévateur/abaisseur de la batterie

$$V_B = e_B - r_B i_B$$

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_B} [V_B - (1 - \mu_B)V_{DC}] \quad 3.21$$

3.4.2.1.4 Modélisation du convertisseur élévateur/abaisseur du SC

$$\begin{aligned} \frac{dV_{SC}}{dt} &= \frac{-1}{C_{SC}} i_{SC} \\ \frac{di_{SC}}{dt} &= \frac{1}{L_{SC}} [V_{SC} - (1 - \mu_{SC})V_{DC}] \end{aligned} \quad 3.22$$

3.4.2.1.5 Modélisation de la charge

Le courant et la tension de la charge sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} V_L &= V_{DC} \\ \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L_L} [-E - R_L i_L + V_L] \end{aligned} \quad 3.23$$

3.4.2.1.6 Modélisation globale du système

Le modèle du circuit à partir du schéma présenté dans la Fig 3.4 est donné par le système d'équations d'ordre 6 suivant :

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - \mu_1 x_2] \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{C_{DC}} [\mu_1 x_1 - x_6 + \mu_2 x_3 + \mu_3 x_5] \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L_{SC}} [x_4 - \mu_2 x_2] \\ \dot{x}_4 &= -\frac{1}{C_{SC}} x_3 \\ \dot{x}_5 &= \frac{1}{L_B} [e_B - r_B x_5 - \mu_3 x_2] \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{L_L} [x_2 - R_L x_6 - E_L] \end{aligned} \right. \quad 3.24$$

3.5 Conclusion

Une source électrique hybride pour un véhicule électrique est un système qui utilise une combinaison de différentes sources d'énergie, à savoir, piles à combustible (PàC), de batteries et ou supercondensateurs (SC) pour alimenter un système de traction électrique. Dans les véhicules électriques, la source d'énergie principale est assistée par un ou plusieurs dispositifs de stockage d'énergie. Les deux dispositifs de stockage d'énergie qui sont souvent utilisés sont les batteries et les SCs. Ils peuvent être raccordés à la PàC de plusieurs façons. Une configuration simple consiste à connecter directement deux dispositifs en parallèle (PàC/batterie, PàC/SC,) sur le bus DC. Cependant, de cette façon, la puissance fournie par chaque source ne peut pas être contrôlée, car chaque source peut être utilisée dans des conditions inappropriées, par exemple en termes d'efficacité. Les caractéristiques de tension doivent également correspondre parfaitement aux dispositifs utilisés et seule une fraction de la plage de fonctionnement des sources peut être utilisée, par exemple, dans une configuration de PàC/batterie, la PàC doit fournir presque toujours la même puissance en raison de la tension fixe de la batterie. En introduisant des convertisseurs DC/DC, on peut choisir la contribution de la puissance de chaque source.

Ce chapitre est dédié à la modélisation des systèmes hybrides utilisés dans les véhicules électriques. Différentes connexions des sources au bus DC ont été présentées. Nous nous sommes concentrés dans ce travail de thèse sur l'utilisation d'un convertisseur pour chaque source afin d'avoir plus de degrés de liberté. De plus, nous avons présenté et modélisé différentes topologies hybrides à savoir PàC/batterie, PàC/SC et deux systèmes d'ordre différents pour l'architecture PàC/batterie/SC et cela pour les applications de traction des véhicules électriques. La représentation sous forme d'équations d'état des sources hybrides a été présentée en incluant les convertisseurs. Le travail présenté dans ce chapitre est une étape importante pour les travaux du chapitre suivant dédié à la commande et à la gestion de l'énergie de ces systèmes énergétiques.

Chapitre 4 :
Commande et gestion de l'énergie des systèmes
hybrides pour les véhicules électriques

4 Commande et gestion de l'énergie des systèmes hybrides pour les véhicules électriques

4.1 Contrôle fondé sur la passivité

Au cours des dernières années, nous avons vu apparaître dans la littérature du contrôle non-linéaire, tant théorique qu'appliqué, une prédominance croissante des techniques de contrôle qui respectent et exploitent efficacement la structure du système par rapport aux techniques plus classiques qui tentent d'imposer un comportement dynamique prédéterminé principalement par l'annulation de la non-linéarité et le gain élevé (domination de la non-linéarité) [130]. L'intérêt que ce domaine de recherche a suscité nous porte à croire que nous assistons enfin à l'épilogue de l'ère du "haut gain" en contrôle non linéaire, pour entrer dans une période où nous allons "respecter et apprendre à vivre" avec la non-linéarité [26], [131]. La propriété de passivité joue un rôle central dans la plupart de ces développements [26], [130], [131]

Ce chapitre fournit le contexte théorique du contrôle fondé sur la passivité qui sera utilisée dans cette thèse pour la gestion énergétique des systèmes électriques hybrides. Pour une étude plus détaillée et plus complète sur le contrôle basé sur la passivité, le lecteur est invité à consulter les références [130], [132]–[134]. Dans la première section, nous motivons l'idée de base du contrôle par la passivité en rappelant certaines propriétés des systèmes passifs. Nous introduisons ensuite la classe des systèmes Hamiltoniens par Port, qui sont passifs par nature. Sur cette base, nous présentons la méthode IDA-PBC, qui est l'approche de contrôle basée sur la passivité sur laquelle nous allons nous concentrer dans ce travail de thèse. Après, nous présentons la gestion de l'énergie basée sur la méthode IDA-PBC de différents systèmes hybrides étudiés dans cette thèse.

4.1.1 Préliminaires

4.1.1.1 Passivité et dissipativité

Les concepts de passivité offrent un attrait physique et intuitif. C'est l'un des principaux avantages qui explique la longévité du concept depuis son apparition, il y a 60 ans. L'idée première dans les systèmes passifs est que l'énergie entrant dans le système n'est pas inférieure que l'augmentation de l'énergie stockée. Ils ne peuvent donc pas stocker plus d'énergie que celle qui leur est fournie de l'extérieur, la différence étant l'énergie dissipée.

Nous allons aborder brièvement les concepts de la dissipativité et de la passivité ainsi que certains résultats reliés qui sont pertinents pour la suite. À l'origine, la notion de passivité était utilisée en théorie des réseaux pour caractériser les fonctions de transfert rationnelles qui peuvent être réalisées uniquement avec des résistances, capacités et inductances de valeurs positives [95]. Mais déjà dans les années 1960, la passivité a été étudiée dans un contexte théorique de contrôle en raison de son lien avec la stabilité, alors qu'avant, la passivité avait été traitée comme une pure propriété entrée-sortie [135][136]. Au début des années 1970, Willems a étudié la passivité et le concept plus général de dissipative pour les systèmes non linéaires dans la représentation de l'espace d'état et a fourni une théorie des systèmes en introduisant les notions de la fonction de stockage et de l'énergie apportée [137] [138].

Considérant un système non-linéaire décrit comme suit :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x)\end{aligned}\tag{4.1}$$

Avec l'état, $x \in \mathbb{R}^n$ la commande $u \in \mathbb{R}^m$, la sortie $y \in \mathbb{R}^m$, et $f(x), g(x), h(x)$ sont des fonctions locales de Lipschitz⁵ [139].

Supposons que $f(x^*) = 0$, pour un $u(t)$ particulier, la solution de l'équation Eq.4.1 est désignée par $x(t; x_0; u)$. Nous définissons la fonction $w: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$, appelée taux d'énergie apportée et supposons que pour tous $u \in \mathbb{R}^m$ et $x \in \mathbb{R}^n$, la sortie $y = h(x(t, x_0, u))$ de l'équation Eq.4.1 est telle que $\int_0^t |w(u(\tau), y(\tau))| d\tau < \infty$ et cela pour tout $t \geq 0$.

Définition 4.1 : le système Eq.4.1 est dissipatif avec le taux d'énergie apportée w , s'il existe une fonction non-négative $H: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, appelée la fonction de stockage, tel que pour tout $u \in \mathbb{R}^m, x_0 \in \mathbb{R}^n, t \geq 0$

$$H(x(t)) - H(x_0) \leq \int_0^t w(u(\tau), y(\tau)) d\tau\tag{4.2}$$

Définition 4.2 : le système non-linéaire Eq.4.1 est passif, s'il est dissipatif avec le taux d'énergie apportée $w(u, y) = y^T u$.

La fonction de stockage peut être interprétée comme l'énergie du système, le taux d'énergie apportée est la puissance d'entrée et $\int_0^t w(u(\tau), y(\tau)) d\tau$ est l'énergie fournie au système depuis l'extérieur [115]. Par conséquent, en ce qui concerne un système dissipatif, l'augmentation de son énergie ne peut être supérieure à l'énergie qui lui est fournie de l'extérieur [116][130]. En d'autres termes, un système dissipatif ne contient pas de sources d'énergie.

Si la fonction de stockage est continûment différentiable, l'équation Eq.4.2 est équivalente à $\dot{H}(x) \leq w(u, y)$ qui est appelée la différentielle de l'inégalité de dissipation et en cas de passivité, elle est donnée par :

$$\dot{H}(x) \leq y^T u\tag{4.3}$$

Nous pouvons voir que pour $u = 0$, la fonction de stockage satisfait à $\dot{H}(x) \leq 0$. Par conséquent, si $H(x)$ est définie positive à x^* , elle joue le rôle de la fonction de Lyapunov et on peut conclure que x^* est un équilibre stable du système [95], [115], [139].

La stabilité asymptotique peut être établie en invoquant la définition 4.2 (théorème de Krasovskii-LaSalle) [138]. En renforçant la négativité de la dérivé de la fonction de stockage, en plus le retour d'état de la forme $u = -k_u y$ avec $k_u > 0$ peut être appliqué qui est connu sous le nom d'injection d'amortissement [98], [134]. Et si le système est détectable à l'état 0, cela signifie que la stabilité asymptotique est obtenue [117]. C'est ce qui motive l'approche de contrôle fondé sur la passivité qui vise à rendre le système en boucle fermée passif par rapport à une fonction de stockage souhaitée afin d'obtenir la stabilité asymptotique du point d'équilibre souhaité [98], [134].

Il ressort clairement de cette interprétation de l'énergie que le concept de passivité est lié aux propriétés de stabilité des systèmes [140]. Par exemple, en introduisant une interconnexion par rétroaction (feedback) comme un processus d'échange d'énergie, il n'est pas surprenant de constater que la passivité est invariante en cas d'interconnexion à contre-réaction négative [132], [133], [138]. En d'autres termes, l'interconnexion de la rétroaction de deux systèmes passifs est toujours passive (comme le montre l'exemple de la Fig.4.1) [117][130]. Soit deux systèmes non linéaires $\Sigma_1: u_1 \rightarrow y_1$ et $\Sigma_2: u_2 \rightarrow y_2$, alors le système en boucle fermée est aussi passif [117][130].

Si le bilan énergétique global est positif, en ce sens que l'énergie générée par un sous-système est dissipée par l'autre, la boucle fermée sera stable.

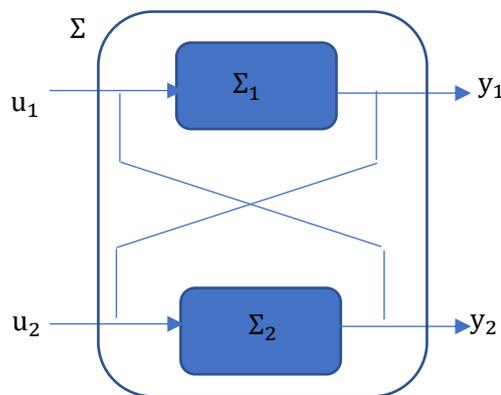


Fig.4.1 interconnexion des systèmes passifs [130]

Considérer les systèmes dynamiques comme des dispositifs de transformation de l'énergie est particulièrement utile pour étudier les systèmes non-linéaires complexes en les décomposant en sous-systèmes plus simples qui, une fois interconnectés, additionnent leurs énergies pour déterminer le comportement du système complet [117]. Cela permet de résoudre le problème de contrôle en trouvant un système dynamique et un modèle d'interconnexion de telle sorte que la fonction énergétique globale prenne la forme souhaitée [141]. De plus, en raison de l'universalité des concepts d'énergie, cette formulation permet de faciliter la communication entre les praticiens et les théoriciens du contrôle en intégrant les connaissances préalables et en fournissant des interprétations physiques à l'action de contrôle [117].

4.2 Représentation PCH

Dans la présente sous-section, nous décrivons la catégorie des systèmes port Hamiltonien (PH) et nous examinons certaines de leurs propriétés. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur à la référence [142]. Les systèmes Port-Hamiltoniens peuvent être considérés comme une généralisation bien connue des systèmes Hamiltoniens, qui sont fréquemment utilisés en mécanique. Ils résultent naturellement de la modélisation en réseau de systèmes physiques à paramètres globaux et sont intrinsèquement passifs [143]. Ce travail de thèse est consacré à l'analyse et au contrôle des systèmes dynamiques non-linéaires qui peuvent admettre une représentation particulière, appelée modèle PH.

Les modèles PH sont dotés d'une structure géométrique spéciale où l'on souligne l'importance de la fonction énergétique et le schéma d'interconnexion qui sont les ingrédients essentiels de la méthode de

contrôle fondé sur la passivité (en anglais Passivity Based Control PBC) qui sera appliquée par la suite. Comme c'est montré dans [1], [21], les systèmes PH englobent une très large classe de systèmes physiques non-linéaires. Cette approche est particulièrement utile pour un traitement mathématique systématique des systèmes multi-physiques, c'est-à-dire des systèmes contenant des sous-systèmes de domaines physiques différents [20]. De plus, les systèmes PH ne sont pas limités aux systèmes physiques, de fait, un avantage de cette approche est son extension aux modèles de systèmes physiques avec des composants de systèmes virtuels, qui peuvent ou non imiter une dynamique physique [143], [144].

Le système port-Hamiltonien (PH) permet de décrire de nombreux systèmes physiques en termes de structure d'interconnexion des éléments et de fonction énergétique [117], [143]. Cela est particulièrement utile dans le contexte de la modélisation de systèmes non-linéaires complexes en tant que sous-systèmes plus simples qui peuvent être interconnectés pour modéliser un système physique plus complexe [145]. La théorie PH fournit également un certain nombre d'outils pour exploiter cette structure lors de la conception des contrôleurs [145]. En effet, les systèmes PH peuvent interagir avec leur environnement via les ports [146]. Notant que l'interconnexion de deux ou plusieurs systèmes PH d'une manière qui préserve l'énergie donne de nouveau un système PH [143], [145], [146].

En effet, quand nous parlons de la représentation des systèmes dynamiques, nous essayons de décrire le système d'une bonne façon. C'est ce qui est permis par l'utilisation de la modélisation par représentation Hamiltonienne contrôlée par port (PCH). En plus, la motivation de l'utilisation de la représentation PCH est de proposer un nouveau paradigme pour la théorie du contrôle qui est une alternative à l'existant et qui est un traitement de signal pour le contrôle des systèmes physiques [147]. D'après [147][115]–[117], [147], les modèles PCH fournissent une description appropriée de la dynamique du système car ce modèle décrit les informations dont nous avons besoin pour la conception d'un nouveau contrôle de paradigme.

Nous nous écartons dans ce travail de la description des systèmes Euler–Lagrange (EL) et nous envisageons plutôt des modèles Hamiltoniens contrôlés par ports (PCH), qui englobent une très grande classe de systèmes physiques non linéaires, contenant strictement la classe des modèles d'EL [98], [115]. Ces résultats sont issus de la modélisation en réseau des systèmes physiques à paramètres globaux en conservant l'énergie avec des éléments de stockage indépendants [117], comme alternative aux modèles EL plus classiques (ou standard Hamiltoniens). En plus d'hériter les caractéristiques de bilan énergétique des systèmes physiques, comme dans les modèles EL, les modèles PCH fournissent une classification des variables et des équations en celles associées aux propriétés phénoménologiques et celles définissant la structure d'interconnexion liée aux échanges d'énergie [141], [146]. Ils sont donc bien adaptés pour réaliser les étapes de base de la PBC, à savoir la modification de la fonction énergétique et l'ajout de la dissipation [131], [147]. En outre, la structure géométrique de l'espace d'état des systèmes PCH peut être utilisée de manière efficace pour le contrôle fondé sur la passivité (PBC Passivity Based Control).

Une approche pour ce faire est le contrôle fondé sur la passivité (Passivity Based Control (PBC)), qui exploite la propriété de passivité pour atteindre l'objectif de contrôle souhaité en rendant le système en boucle fermée passif par rapport à une fonction de stockage souhaitée [95], [103]. Toutefois, les méthodes PBC exigent des informations qui ne sont pas toujours disponibles. L'une des principales méthodes de rétroaction de sortie pour les systèmes PH est le contrôle par interconnexion (CBI Control By Interconnexion) [148][142]. Dans cette méthode, le contrôleur est également modélisé comme un

système PH. En interconnectant les deux d'une manière qui préserve l'énergie, l'énergie du contrôleur s'ajoute à l'énergie de l'installation. Une relation entre les états de l'installation et du régulateur est trouvée au moyen d'invariants dynamiques (appelés fonctions Casimir) [142], [145]. Ainsi, l'énergie du système en boucle fermée peut être façonnée selon les besoins.

Il existe de nombreuses représentations des systèmes PH. Dans ce travail de thèse, nous focalisons notre attention à la forme dite d'entrée-sortie, où l'état est supposé de dimension finie et les variables de port sont les vecteurs entrés et sortie. Le système Eq.4.1 est représenté sous la forme PCH comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [J(x) - R(x)]\nabla H(x) + g(x)u \\ y &= g^T(x)\nabla H(x) \end{aligned} \quad 4.4$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$ sont les variables d'énergie. Les variables de port entrée sortie u et y sont des variables conjuguées, c'est-à-dire que leur produit donne la puissance échangée entre le système et son environnement (par exemple, les forces et vitesses dans un système mécanique). La fonction $H : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ représente l'énergie totale stockée dans le système. $J : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'interconnexion qui est antisymétrique c.-à-d, $J^T(x) = -J(x)$ et elle traduit la structure d'interconnexion interne du système, tandis que la matrice d'entrée de rang complet $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ représente l'interconnexion du système avec son environnement. La matrice de dissipation $R : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ est semi-définie positive $R^T(x) = R(x) \geq 0$ qui indique la structure résistive du système.

Les éléments constitutives (4.4) J, R, H, g du système dynamique présentent les significations physiques suivantes :

- $H(x)$ est la fonction Hamiltonienne qui est définie comme la quantité d'énergie stockée dans le système. Elle est supposée bornée inférieurement. Elle représente la somme des énergies décrivant des phénomènes de stockage de type capacitif, inductif, inertiel, gravitationnel, de pression, etc...
- La matrice de structure J caractérise les échanges réversibles au sein du système.
- La matrice de dissipation R localise les phénomènes de dissipation d'énergie. Elle décrit des phénomènes de type résistif, frottement, perte de charge, etc.

En utilisant la notion d'antisymétrie de $J(x)$, l'équation du bilan énergétique est alors :

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \frac{\partial^T H(x)}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial^T H(x)}{\partial x} \left([J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x}(x) + g(x)u \right) \\ &= -\frac{\partial^T H(x)}{\partial x} R(x) \frac{\partial H}{\partial x}(x) + u^T y \\ \dot{H} &= -\nabla^T H(x) R(x) \nabla H(x) + u^T y \end{aligned} \quad 4.5$$

Le taux de changement de l'énergie du système, où le premier terme à droite ($-\nabla^T H(x) R(x) \nabla H(x)$) décrit la dissipation de l'énergie dans les éléments résistifs du système. Ce terme est non positif en raison de $R(x) \geq 0$ et donc $\dot{H}(x) \leq y^T u$. Par conséquent, si $H(x)$ est délimitée par le bas, le système peut être

rendu non négatif en ajoutant simplement une constante. Donc, le système (Eq.4.4) est passif où $H(x)$ est la fonction de stockage.

La notion de la passivité est un concept important dans les systèmes PH. La passivité est la propriété fondamentale des systèmes dynamiques et peut être référée directement à l'inégalité $\dot{H}(x) \leq y^T u$. En effet, en intégrant le système (4.5), nous obtenons l'équation d'équilibre de l'énergie suivante :

$$\underbrace{H[x(t)] - H[x(0)]}_{\text{energie de stockage}} = \underbrace{\int_0^t u^T(s)y(s)ds}_{\text{energie apportée}} - \underbrace{\int_0^t \left[\frac{\partial H}{\partial x}[x(s)] \right]^T R(x(s)) \left[\frac{\partial H}{\partial x}[x(s)] \right] ds}_{\text{energie déssipée}}$$

Cette égalité montre que pour un système Hamiltonien passif, l'énergie à t est égale à celle à 0 , diminuée par l'énergie dissipée et modifiée par l'énergie apportée qui transite par les variables entrée-sortie durant la période $[0, t]$ [117]. On retrouve l'interprétation intuitive de l'accumulation des échanges à la dissipation près. Par conséquent, le taux de décroissance de la fonction de stockage est connu par le taux de dissipation d'énergie et entre dans l'étude de la convergence asymptotique [94], [149].

Cela suggère que le problème de passivation peut être résolu en assignant une structure PCH au système en boucle fermée, ce qui conduit à la méthodologie IDA [150], [151]. Notre principal objectif dans ce travail de thèse est d'utiliser la théorie IDA-PBC, qui s'étend à une classe plus large de systèmes, par exemple, aux applications qui nécessitent la mise en forme de l'énergie totale. La section suivante traite de la méthodologie IDA-PBC.

4.3 Commande d'IDA-PCH

L'une des principales questions en théorie du contrôle est qu'avec un système d'entrée $S1$ (voir Fig.4.2), comment concevoir un deuxième système $S2$ (le contrôleur), de sorte que lorsqu'ils sont interconnectés, ils se comportent d'une certaine manière prédéterminée ? Les réponses sont multiples mais la notion de rétroaction est incontestablement l'un des éléments clés de toute conception réussie [145]. Le schéma de la Fig.4.2 montre le principe de la théorie du contrôle.

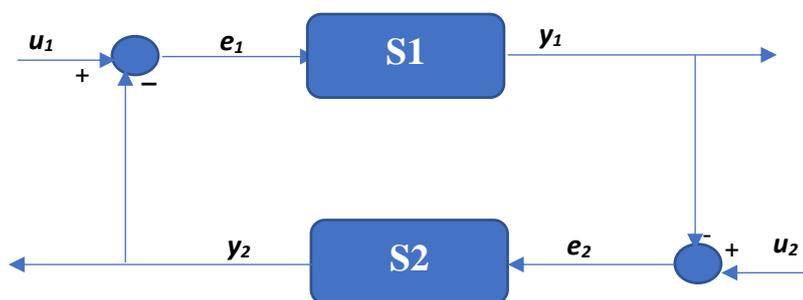


Fig.4.2. Interconnexion de rétroaction [97]

Cette thèse s'inscrit dans un nouveau changement de paradigme dans lequel l'énergie est l'objet central du problème de contrôle. Il joue le rôle principal dans la phase de modélisation, la spécification des objectifs de performance et la phase de conception. La fonction énergétique d'un système détermine à la fois son comportement statique et transitoire, via le transfert d'énergie entre les sous-systèmes [152]. Les systèmes $S1$ et $S2$ de la Fig.4.2 sont considérés comme des dispositifs de transformation de l'énergie qui

sont interconnectés pour obtenir le comportement souhaité. Les avantages d'adopter une approche énergétique sont multiples, les modèles mathématiques sont les plus simples et la synergie résulte de l'intuition physique et de la rigueur mathématique [152]. Pour cela, la représentation PCH est choisie dans cette thèse qui est l'une des méthodes mathématiques la plus utilisée dans la conception du contrôle des systèmes non-linéaires. En effet, la modélisation PCH présente une étape importante pour la conception de la commande fondée sur la passivité [152]. Avant d'entamer le cœur du sujet qui est le contrôle fondé sur la passivité, il est nécessaire de passer par des notions de base telles que, l'échange d'énergie, façonnage de l'énergie et la dissipation de l'énergie.

4.3.1 Echange d'énergie, façonnage et dissipation de l'énergie

La notion de passivité est étroitement liée à la propriété fondamentale de la conservation de l'énergie [96]. Le contrôle fondé sur la passivité fait référence à une méthodologie de conception de contrôleur qui, fondée sur les propriétés de passivité du système d'entrée, propose un contrôleur qui transforme le système d'entrée en un autre système passif, ayant une fonction énergétique différente "façonnée" [153][141]. En effet, dans le but de stabiliser un point d'équilibre, on vise une fonction d'énergie définie positive qui sert de fonction de Lyapunov [94], [95]. Dans un deuxième temps, l'amortissement est ajouté au système pour améliorer la stabilité transitoire ou asymptotique [96][115], [117], [150]. Cette procédure est également connue sous le nom d'injection d'énergie et d'amortissement. L'injection d'amortissement revient simplement à sélectionner une fonction ϕ , définie sur l'ensemble de la sortie y et à prendre ses valeurs sur l'ensemble d'entrée u , de sorte que $y^T \phi(y) > 0$ [67], [117]. Le vrai défi est donc de résoudre le problème de façonnage de l'énergie.

Un exemple est proposé afin de montrer l'idée de base du façonnage de l'énergie, supposant que S_1 et S_2 sont donnés sous la forme suivante :

$$S_i: \begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_i, e_i) \\ y_i = h_i(x_i, e_i) \end{cases}, i = 1, 2.$$

Si les systèmes sont passifs, donc il existe des fonctions $H_i(x_i)$ qui quantifient leur énergie stockée lorsqu'ils sont aux états x_i . Une énergie additionnelle peut être ajoutée ou extraites par des ports de puissances (e_i, y_i) . Une partie de l'énergie est souvent dissipée dans l'environnement [97].

L'interconnexion par rétroaction (voir Fig.3.2) :

$$\begin{aligned} e_1 &= u_1 - y_2 \\ e_2 &= u_2 - y_1 \end{aligned}$$

Produit un nouveau système :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{aligned}$$

Avec,

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

Donc, l'idée de l'approche du contrôle basé sur la passivité est traitée non par le traitement du signal mais plutôt le traitement de l'énergie [154]. En effet, tous les systèmes physiques doivent satisfaire la relation du bilan énergétique (4.6), qui est exprimée par la relation suivante :

$$\text{Energie stockée} = \text{Energie apportée} + \text{Energie dissipée}$$

4.6

C'est la raison pour laquelle notre intérêt est porté sur la théorie du développement de cette classe de systèmes. La question qui doit être posée maintenant est comment peut-on formuler ce problème ?

La réponse à cette question est la possibilité de modifier l'énergie de stockage en ajoutant la quantité désirée de l'énergie stockée, donc la fonction d'énergie doit être changée. Par conséquent, nous aurons une nouvelle fonction d'énergie, ainsi que la fonction de dissipation qui peut être ajoutée ou supprimée [152]. De ce fait, le nouveau bilan énergétique est exprimé comme suit :

$$\text{Energie stockée désirée} = \text{nouvelle énergie apportée} + \text{Energie dissipée désirée} \quad 4.7$$

Donc, la conservation de l'énergie doit être maintenue même après le contrôle du système mais avec une nouvelle fonction d'énergie, une nouvelle dissipation et une nouvelle énergie apportée [154] [152]. Ceci est l'objectif du contrôle basé sur la passivité qui est la préservation de la propriété de la conservation de l'énergie. En d'autres termes, la passivité consiste essentiellement en deux étapes : changement de la fonction d'énergie et le changement de la structure de dissipation.

$$\text{PBC} = \text{énergie façonnée} + \text{assignation d'amortissement} \quad 4.8$$

4.3.2 Approches du contrôle basées sur la passivité

Deux grands groupes du contrôle par passivité sont basés sur l'idée de la conservation de l'énergie, qui est:

- *PBC classique* : où nous sélectionnons a priori la fonction de stockage à assigner et nous concevons par la suite le contrôleur qui rend la fonction de stockage non croissante [96], [148]. Cette approche, qui rappelle clairement les méthodes classiques de Lyapunov, a été très efficace pour contrôler les systèmes physiques décrits par les équations de mouvement d'Euler-Lagrange [150], incluant les applications mécaniques, électriques et électromécaniques. Les approches dans cette catégorie sont essentiellement la PBC standard et le bilan d'énergie.

- PBC standard :

Dans la formulation PBC standard, il est préférable de concevoir une loi de commande, par exemple $u = \beta(x) + v$, telle que la boucle fermée satisfasse à la nouvelle équation du bilan énergétique [148]:

$$\dot{H}_d(x) = v^T(s)z(s) - d_d(x) \quad 4.9$$

Où, $H_d(x)$ est la fonction d'énergie désirée, la nouvelle sortie passive est donnée par z (qui peut être égale à y et l'amortissement naturelle $d(x)$ est remplacée par un amortissement désiré $d_d(x) \geq 0$ pour assurer un taux de convergence plus rapide [154]. La fonction d'énergie désirée est choisie telle qu'elle ait un minimum strict au point x désiré et est connue sous le nom de façonnage d'énergie, tandis que la modification de la fonction de dissipation est appelée injection d'amortissement [154].

Cependant, la PBC standard a montré que pour assigner la fonction de stockage donnée qui n'a pas nécessairement l'interprétation de l'énergie totale, ces conceptions entraînent une inversion non naturelle du système le long des trajectoires de référence, ce qui détruit la structure [133].

- *PBC via la Balance d'énergie* :

Définissons la fonction d'énergie ajoutée comme suit :

$$H_a(x) = H_d(x) - H(x) \quad 4.10$$

D'après la loi de retour d'état (state feedback), la stabilisation via le bilan d'énergie est atteinte lorsque l'énergie ajoutée est égale à l'énergie fournie par l'environnement [94], tel que :

$$\dot{H}_a(x) = -\beta^T(x)y \quad 4.11$$

L'énergie en boucle fermée est égale à la différence entre l'énergie stockée et celle fournie et donc cette classe de PBC est connue comme la PBC via le bilan d'énergie [141].

Dans la deuxième classe de PBC, nous ne fixons pas la fonction de stockage en boucle fermée, mais nous sélectionnons plutôt la structure désirée du système en boucle fermée (dans notre cas Hamiltonien commandé par port), ensuite nous caractérisons toutes les fonctions énergétiques assignables compatibles avec cette structure [117], [150], [155]. Cette caractérisation est donnée en termes de solution d'une équation aux dérivées partielles (PDE) [134]. Parmi les approches classées dans cette catégorie, nous citons : Lagrangien contrôlé et Interconnection and Damping Assignment (IDA) [130]. Dans la suite, nous nous limitons à présenter l'approche IDA-PBC qui entre dans le cadre de ce travail de thèse.

4.3.3 Commande IDA-PBC

La méthode IDA-PBC est une technique qui régule le comportement des systèmes non linéaires en assignant une structure souhaitée (Hamiltonien contrôlée par port) en boucle fermée [116], [150]. Depuis l'introduction de cette méthodologie de conception de contrôleur, de nombreuses extensions théoriques et applications pratiques ont été rapportées dans la littérature. Les développements théoriques comprennent des variations et des raccourcis qui sont utiles lorsqu'il s'agit de classes particulières de systèmes, ainsi que l'incorporation de fonctions supplémentaires pour gérer des scénarios de contrôle autres que la simple stabilisation. Du côté de l'application, la méthode a apporté des solutions à une grande variété de problèmes physiques [94], [98], [115]. Il est à noter que la méthode IDA-PBC fait son apparition lors d'un problème de régulation par retour d'état d'un bras manipulateur en 1981 [94], [98], [115].

4.3.3.1 Propriétés de la stabilité des systèmes IDA-PBC

Le mécanisme de stabilisation dans IDA-PBC est clair lorsqu'il est appliqué pour les systèmes PCH ayant des propriétés d'amortissement adaptées [150], [151]. De plus, il a été montré que si aucun amortissement n'est ajouté dans les coordonnées où la fonction $H(x)$ doit être modifiée (c'est-à-dire $R_d(x) = R(x)$) et que l'amortissement naturel du système PCH satisfait à l'équation suivante :

$$R(x)(\nabla H_d - \nabla H) = 0 \quad 4.12$$

La fonction d'énergie désirée peut être exprimée comme suit :

$$H_d(x(t)) = H(x(t)) - \int_0^t u^T(s)y(s)ds \quad 4.13$$

Comme révèle cette expression, dans ce cas, l'IDA-PBC assigne comme une différence de fonction d'énergie entre l'énergie stockée dans le système et l'énergie fournie, donc nous pouvons dire que le contrôleur est en équilibre d'énergie [115].

Même si 4.12 n'est pas satisfaite, l'action du contrôle de l'IDA-PBC admet une interprétation d'équilibre énergétique, comme montré dans l'étude [151], [156] dans le cas où ni la matrice d'interconnexions ni la matrice d'amortissement ne sont modifiées (c'est-à-dire $R_d(x) = R(x)$, $J_d(x) = J(x)$), donc la fonction d'énergie désirée $H_d(x(t))$ satisfait toujours 4.13 avec y qui est remplacé par une nouvelle sortie.

$$\tilde{y} = -g^T(x)[J(x) - R(x)]^{-T} \times \{[J(x) - R(x)]\nabla H + g(x)u\} \quad 4.14$$

4.3.3.2 Propriété de stabilisation universelle d'IDA-PBC

Dans cette section, nous montrons que la méthodologie IDA-PBC est universellement stabilisante, en ce sens qu'elle génère tous les contrôleurs à stabilisation asymptotique des systèmes non-linéaires de la forme (4.4). Cela est montré dans le lemme ci-dessous, qui dit :

Lemme 1 : Comme expliqué dans [117], [147], [155], si le système $\dot{x} = f(x)$ à a un point d'équilibre asymptotiquement stable x_* , alors il existe une fonction $H_d(x)$ définie positive et des matrices $J_d(x) = -J_d^T(x)$, $R_d(x) = R_d^T(x) \geq 0$ de telle sorte que :

$$f(x) = [J_d(x) - R_d(x)]\nabla H_d(x) \quad 4.15$$

Il convient de souligner que la preuve de ce lemme est constructive, à condition de connaître la fonction de Lyapunov $H_d(x)$.

4.3.4 Méthodologie de la méthode IDA-PBC :

Pour la conception de la commande IDA-PBC, le modèle Hamiltonien contrôlé par port est considéré. Il résulte de la modélisation de la conservation d'énergie des systèmes physiques avec des éléments de stockage indépendants [96]. Ce modèle s'étend à une classe plus large de systèmes. La structure Hamiltonien physique est préservée en boucle fermée, la fonction de stockage est l'énergie totale du système en boucle fermée [157]. Dans l'approche IDA-PBC, la fonction d'énergie en boucle fermée est obtenue via la solution d'une équation différentielle partielle PDE, en raison du choix des sous-systèmes désirés de l'interconnexion et d'amortissement [116].

Dans l'IDA-PBC, la PDE est décrite en termes de matrices d'interconnexion entre les sous-systèmes et l'amortissement. Plusieurs interprétations peuvent être données du rôle joué par ces matrices. D'un point de *vue théorique* des systèmes, ils peuvent être considérés, soit comme des multiplicateurs (de la théorie classique des entrées-sorties) qui nous aident à appliquer la propriété de passivité requise [116], soit comme des couplages dynamiques qui permettent la propagation de la dissipation. Dans le cas *des systèmes physiques*, les matrices d'interconnexion et d'amortissement déterminent respectivement l'échange d'énergie et la dissipation du système, et par conséquent elles peuvent souvent être judicieusement choisies en invoquant ce type de considérations physiques [154], [158].

Donc, la procédure de cette méthode commence à partir de la description des systèmes par un modèle PCH, qui est de la forme suivante (4.4).

L'IDA-PBC était introduite comme une procédure pour contrôler les systèmes physiques décrit par le modèle PCH. Cependant, dans certaines applications, les modèles PCH physiques sont trop complexes pour la conception de contrôle et une étape de simplification est généralement nécessaire [116] [98]. Ces simplifications sont habituellement ponctuelles et détruisent la structure de PCH. D'autre part, ils donnent des modèles bien établis qui sont largement acceptés dans la pratique d'où l'intérêt d'étendre l'IDA-PBC à une classe plus générale de systèmes comme décrit dans la proposition suivante.

Proposition 1 : Considérons le système non-linéaire suivant, on le souhaite stabiliser autour d'un point $x_* \in \mathbb{R}^n$.

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad 4.16$$

Supposant qu'il existe les matrices suivantes :

- $g^\perp(x)$, où $g^\perp(x)g = 0$
- $J_d(x) = -J_d^T(x) \rightarrow$ matrice désirée d'interconnexion ou matrice de structure.
- $R_d(x) = R_d^T(x) \geq 0 \rightarrow$ matrice désirée d'amortissement

Ainsi que, la fonction d'énergie désirée $H_d : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ qui a son minimum au point d'équilibre désiré $x_*(x) = \arg \min H_d(x)$, vérifie l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$g^\perp(x)f(x) = g^\perp(x)[J_d(x) - R_d(x)]\nabla H_d \quad 4.17$$

Le système 4.4 en boucle fermée avec $u = \beta(x)$

$$\beta(x) = [g^T(x)g(x)]^{-1}g^T(x) \times \{[J_d(x) - R_d(x)]\nabla H_d - f(x)\} \quad 4.18$$

Prend la forme PCH, tel que :

$$\begin{cases} \dot{x} = [J_d(x) - R_d(x)]\nabla H_d \\ y = g^T(x)\nabla H_d \end{cases} \quad 4.19$$

x_* est l'équilibre stable (local). Il est asymptotiquement stable si en plus x_* est un minimum isolé de la fonction H_d et le plus grand ensemble d'invariants du système (4.15) de la dynamique en boucle fermée contenu dans :

$$\{x \in \mathbb{R}^n, H_d^T R_d(x) \nabla H_d = 0\}, \text{ Egale à } \{x_*\}. \quad 4.20$$

La stabilité est globale si H_d est radicalement non bornée [147], [150].

Démonstration :

Prenons la partie droite de (4.20), avec $u = \beta(x)$, égale à la partie droite de l'équation (4.16), nous obtenons l'équation suivante :

$$f(x) + g(x)\beta(x) = [J_d(x) - R_d(x)]\nabla H_d$$

En multipliant la partie gauche par $g^\perp(x)$ (annihilateur gauche de g), nous obtenons l'équation différentielle partielle (4.18). L'expression du control est obtenue en multipliant à gauche par la pseudo-inverse de $g(x)$. La stabilité de x_* est établie le long des trajectoires de (4.19), nous aurons :

$$\begin{aligned}\dot{H}_d &= \nabla H_d^T \dot{x} \\ &= \nabla H_d^T [J_d(x) - R_d(x)] \nabla H_d \\ &= -\nabla H_d^T R_d(x) \nabla H_d \leq 0,\end{aligned}\tag{4.21}$$

Ici, H_d joue le rôle de la fonction de Lyapunov pour le système en boucle fermée. La stabilité asymptotique suit immédiatement en invoquant le principe d'invariance de La Salle et la condition donnée par (4.20) [115], [146], [152]. Enfin, pour s'assurer que les solutions restent limitées, nous donnons l'estimation du domaine d'attraction comme étant le plus grand ensemble de niveaux limités de $H_d(x)$.

Il est clair, qu'à partir de la proposition 1, que l'étape clé dans la procédure de la conception est la solution de l'équation (4.19). Nous soulignons le fait que dans cette équation :

- $J_d(x)$ et $R_d(x)$ sont libres sous la contrainte de l'antisymétrie et de la semi-définition positive des matrices, respectivement ;
- $H_d(x)$ doit être totalement ou partiellement fixe à condition que nous puissions assurer l'équation (4.12).
- Il existe un degré de liberté additionnel dans $g^\perp(x)$ qui n'est pas uniquement définie par $g(x)$ (comme mentionné dans [116], ce degré de liberté peut être utilisé pour linéariser l'équation aux dérivées partielles non-linéaire qui apparait généralement dans les systèmes mécaniques).

Donc, la synthèse du contrôleur IDA-PBC du système non-linéaire sous la forme PCH qui présente deux inconnus qui sont la matrice désirée $[J_d(x) - R_d(x)]$ et la fonction d'énergie désirée $H_d(x)$ (présente dans l'équation du PCH par le biais de son gradient ∇H_d), peut être obtenue essentiellement par deux approches, qui sont :

- Algébrique IDA-PBC : dans ce cas, la fonction d'énergie est fixée et par conséquent le gradient de la fonction d'énergie ∇H_d et la matrice désirée $[J_d(x) - R_d(x)]$ restent libres. Dans ce cas, la procédure de la conception de la commande consiste à résoudre des équations algébriques où l'inconnue est la matrice $[J_d(x) - R_d(x)]$ qui doit caractériser le système par les conditions définies dans la proposition 1 avec le degré de liberté de la commande u [134], [150].
- IDA-PBC non paramétrée : dans cette approche, les matrices désirées de dissipation $R_d(x)$ et d'interconnexion $J_d(x)$ sont fixées et la fonction d'énergie désirée $H_d(x)$ est laissée libre [116], [117]. On obtient ainsi l'équation aux dérivées partielles dont les solutions définissent les fonctions énergétiques admissibles $H_d(x)$ pour les matrices d'interconnexion et d'amortissement données [116], [117]. Notons que la fonction d'énergie désirée a son point minimum au point d'équilibre désirée. Parmi la famille des solutions, nous citons les solutions $x_*(x) = \arg \min H_d(x)$, qui sont des équilibres stables [147], [148] . Ainsi, la stabilité asymptotique appartient à cet ensemble de solutions [147], [148].

La méthode IDA-PBC est une procédure intéressante pour la commande des systèmes physiques. En effet, la formulation d'IDA-PBC présentée ci-dessus vise à faire correspondre exactement le modèle étudié. Cependant, dans certaines applications, cet objectif peut être trop strict et complexe, par exemple, nous pourrions ne pas être en mesure de résoudre l'équation aux dérivées partielles [115], [116], [157]. Dans ce cas, une variante à cette méthode peut être proposée qui repose sur l'introduction d'un terme de perturbation sans détruire les propriétés de stabilité souhaitées.

Il est à noter que la procédure IDA-PBC peut être utilisée pour la stabilisation d'un point d'équilibre et non pour la poursuite de trajectoire [147]. Afin de l'utiliser pour la gestion d'énergie, il existe deux alternatives pour appliquer la méthode IDA-PBC pour la poursuite de trajectoire :

- Changement de repère afin que les trajectoires d'équilibre deviennent des points d'équilibre.
- Réécrire le système en termes d'équations d'erreur de poursuite (changement de variable), ainsi on stabilisera l'équation dynamique d'erreur vers un point d'équilibre au lieu de stabiliser l'état vers une trajectoire d'équilibre.

Dans la suite de ce chapitre, nous appliquons la méthode IDA-PBC pour la gestion d'énergie de différents systèmes hybrides multi-sources multi-convertisseurs pour les applications véhiculaires.

4.4 Gestion de l'énergie des sources hybrides par IDA-PBC

Le véhicule électrique hybride présente une bonne alternative pour remplacer le moteur à combustion interne. Ce système offre une technologie zéro émission. Il existe plusieurs types de véhicules électrifiés, les plus importants d'entre eux sont : Véhicule électrique hybride à PàC, véhicule à batterie, véhicule PàC/Batterie, véhicule électrique PàC/SC et véhicule électrique FC/Batterie/SC. Dans ces technologies, en général, la PàC alimente la charge en phase permanente avec un minimum de variations de courant et la batterie et/ou les SCs fournissent et absorbent les courtes impulsions d'énergie. L'utilisation d'un système de stockage avec la PàC est dû au temps de réponse lent des auxiliaires de la PàC à la demande rapide de la charge. Cependant, le contrôle de la distribution de l'énergie entre les sources embarquées est une tâche importante pour la performance de ces technologies. Cette section met l'accent sur le contrôle non-linéaire basé sur l'approche IDA-PBC qui est appliqué pour la gestion d'énergie des différents systèmes hybrides décrit dans le chapitre 4.

4.4.1 Source hybride PàC/Batterie

La source hybride PàC/batterie étudiée est celle décrite dans la section 3.1. Nous nous intéressons à la gestion d'énergie d'un système multi-convertisseurs multi-sources.

Comme indiqué dans le chapitre 3, le modèle étudié de la source hybride PàC/batterie est un système non-linéaire d'ordre quatre dont le vecteur d'état est comme suit :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [i_{FC}, V_{DC}, i_B, i_L]^T$$

4.4.1.1 Formulation du problème

L'objectif principal qui doit être atteint en appliquant le contrôle non-linéaire IDA-PBC est le contrôle de la tension de la charge et donc de la tension du bus DC à travers les commandes des deux convertisseurs DC-DC des sources embarquées. Aussi, la batterie devra assurer la puissance nécessaire pendant les phases transitoires et en même temps elle alimente la charge lorsque la PàC n'est pas en mesure de

satisfaire la demande en puissance ; par exemple dans le démarrage du système. La stratégie de gestion de l'énergie est basée sur le contrôle du courant de la batterie par rapport à une référence de courant souhaitée. Cette dernière peut être imposée en fonction de différents critères, à savoir l'état de charge de la batterie, état de santé de la PàC, niveau d'hydrogène, démarrage, puissance transitoire de la charge.).

La commande IDA-PBC est utilisée pour répondre à ces objectifs. Pour cela, les différentes étapes de la conception de cette commande sont respectées. En commençant par la représentation mathématique des objectifs cités ci-dessus qui peuvent se faire en imposant les trajectoires d'équilibres à ce système. En effet, les variables du système devront suivre les consignes désirées afin d'atteindre l'objectif de la gestion des flux énergétiques du système étudié.

Le vecteur des variables d'état à l'équilibre est défini comme suit :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4]^T$$

Il est important de souligner que certaines consignes seront imposées par le calcul et d'autres seront définies selon le scénario choisi.

Pour cela, le système d'équations du modèle à l'équilibre s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \frac{1}{L_{FC}} [V_{FC} - \bar{\mu}_1 \bar{x}_2] \\ \dot{\bar{x}}_2 = \frac{1}{L_{DC}} [\bar{\mu}_1 \bar{x}_1 - \bar{x}_4 + \bar{\mu}_2 \bar{x}_3] \\ \dot{\bar{x}}_3 = \frac{1}{L_B} (e_B - r_B \bar{x}_3 - \bar{\mu}_2 \bar{x}_2) \\ \dot{\bar{x}}_4 = \frac{1}{L_L} [-E_L - R_L \bar{x}_4 + \bar{x}_2] \end{cases} \quad 4.22$$

D'où le vecteur d'équilibre est défini comme suit :

$$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4]^T = \left[\bar{x}_1, V_d, I_{Bref}, \frac{V_d - E_L}{R_L} \right]^T$$

Où V_d est la tension désirée du bus à l'équilibre.

Les signaux de commande des convertisseurs des sources embarquées à l'équilibre sont définis selon deux conditions imposées sur le courant de référence de la batterie et qui sont :

1^{er} cas: si $I_{ref} = 0$, les signaux de commande sont:

$$\bar{\mu}_1 = \frac{V_{fc}}{\bar{x}_2} \quad ; \quad \bar{\mu}_2 = \frac{e_B}{\bar{x}_2}$$

2^{ème} cas: si $I_{ref} \neq 0$, les signaux de commande sont:

$$\bar{\mu}_1 = \frac{V_{fc}}{\bar{x}_2} \quad ; \quad \bar{\mu}_2 = \frac{e_B - r_b I_{ref}}{\bar{x}_2} \quad 4.23$$

Dans le système hybride étudié dans cette section (PàC/batterie), le 2ème cas du courant de référence de la batterie est considéré. Dans les travaux de simulation et d'expérimentation, nous avons pris le courant de référence de la batterie comme un signal rectangulaire afin d'évaluer les performances dynamiques de l'algorithme.

4.4.1.2 Représentation PCH et loi de commande IDA-PBC

La méthode IDA-PBC recherche une fonction énergétique H_d de sorte que son minimum soit atteint en un point d'équilibre souhaité. La fonction d'énergie naturelle du système s'écrit comme suit :

$$H = \frac{1}{2} x^T Q x \quad 4.24$$

Avec $Q = \text{diag}(L_{FC}, C_{DC}, L_B, L_L)$

La fonction d'énergie désirée est :

$$H_d = \frac{1}{2} \tilde{x}^T Q \tilde{x} \quad 4.25$$

$\tilde{x} = x - \bar{x}$ est la différence entre la variable d'état et sa référence.

La réécriture du modèle en fonction de la nouvelle variable \tilde{x} est comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_2 + (\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{1}{C_{DC}} [\mu_1 \tilde{x}_1 + \mu_2 \tilde{x}_3 - \tilde{x}_4 + (\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_1 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \frac{1}{L_B} (-\mu_2 \tilde{x}_2 - r_B \tilde{x}_3 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_2) \\ \dot{\tilde{x}}_4 = \frac{1}{L_L} [-E_L - R_L \tilde{x}_4 + \tilde{x}_2] \end{array} \right. \quad 4.26$$

Dans ces conditions, l'écriture du système PCH en fonction de l'erreur \tilde{x} et du gradient de la fonction d'énergie désirée H_d , est comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = [J - R] \nabla H_d + \xi(\bar{x}, \mu, \bar{\mu}) \quad 4.27$$

$$\tilde{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \frac{-\mu_1}{L_{FC}C_{DC}} & 0 & 0 \\ \frac{\mu_1}{L_{FC}C_{DC}} & 0 & \frac{\mu_2}{L_B C_{DC}} & \frac{-1}{L_L C_{DC}} \\ 0 & \frac{-\mu_2}{L_B C_{DC}} & \frac{-r_B}{L_B^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_L C_{DC}} & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix}}_{J-R} \times \underbrace{\begin{bmatrix} L_{FC} \tilde{x}_1 \\ C_{DC} \tilde{x}_2 \\ L_B \tilde{x}_3 \\ L_L \tilde{x}_4 \end{bmatrix}}_{\nabla H_d} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_{FC}} (\bar{\mu}_1 - \mu_1) \bar{x}_2 \\ \frac{1}{C_{DC}} (\mu_1 - \bar{\mu}_1) \bar{x}_1 - (\mu_2 - \bar{\mu}_2) \bar{x}_3 \\ \frac{1}{L_B} (\bar{\mu}_2 - \mu_2) \bar{x}_2 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\xi(\bar{x}, \mu, \bar{\mu})}$$

La méthode IDA-PBC dote le système en boucle fermée d'une structure de PCH afin de trouver une loi de commande qui stabilise le système au sens de Lyapunov. Cela, en modifiant les matrices d'interconnexion et d'amortissement. Ceci donne la loi de commande suivante :

$$\begin{cases} \mu_1 = \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = \bar{\mu}_2 - r \tilde{x}_3 \end{cases} \quad 4.28$$

Avec r , un paramètre positif qui représente le gain de réglage.

Preuve de stabilité :

Proposition 2: considérons le système PCH (4.29) en boucle fermée avec les contrôleurs à l'équilibre (4.23), la loi de commande (4.29) ainsi que la fonction d'énergie radialement non bornée (4.25) est globalement stable.

Preuve: l'équation de la dynamique d'erreur en boucle fermée du système PCH avec (4.23), (4.28), est :

$$\dot{\tilde{x}} = [J(\mu) - R'] \nabla H_d \quad 4.29$$

$$\text{Où } R' = \text{diag} \left\{ 0; 0; \frac{r_B + r V_d}{L_B^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = R'^T \geq 0$$

Ainsi, la dérivée temporelle de la fonction d'énergie désirée le long de la trajectoire (4.29) est défini semi-négative, comme montré par :

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{\tilde{x}} = -\nabla H_d^T R' \nabla H_d \leq 0 \quad 4.30$$

Par conséquent, l'origine est globalement stable.

La Fig.4.3 illustre la structure globale de la commande IDA-PBC de la source hybride étudiée où la PàC et la batterie assurent la demande en puissance de la charge.

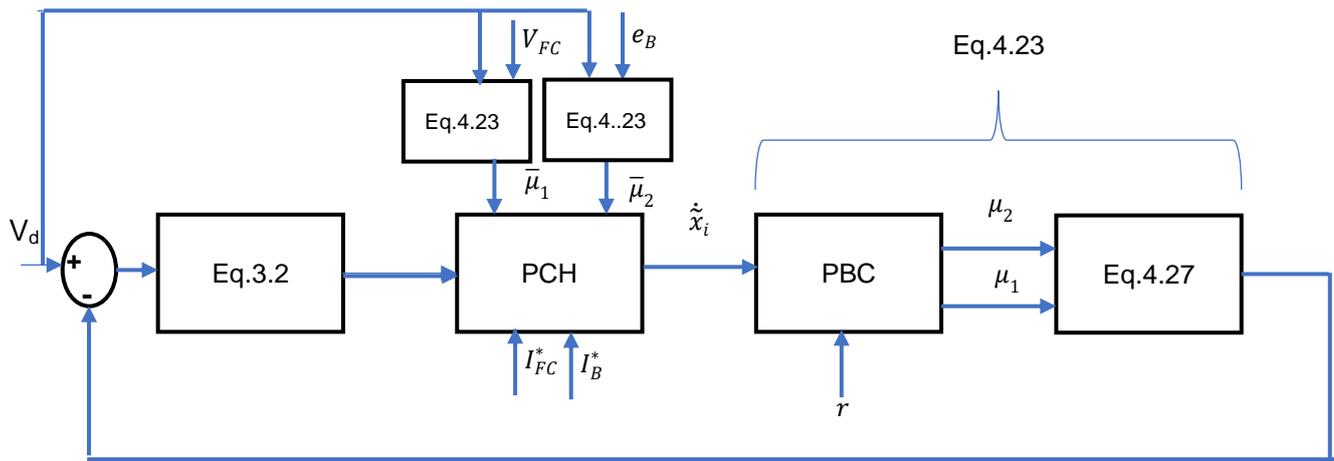


Fig.4.3 étapes de la commande IDA-PBC de la source hybride étudiée où la PàC/batterie

4.4.1.3 Résultats de simulation

Le modèle étudié de la source hybride PàC/Batterie a été implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink. Différents résultats du comportement électrique des sources embarquées sont présentés dans cette section. Les paramètres utilisés pour la simulation sont donnés dans le tableau 4.1:

Table.4.1. Les principaux paramètres utilisés en simulation

PàC	$L_{FC} = 500 * 73 * 10^{-6}H$
Batterie	$L_B = 0.008H$ $e_B = 12V$ $r_B = 0.005 \Omega$
Bus DC	$V_d = 36V - 42V$ $L_L = 0.003H$

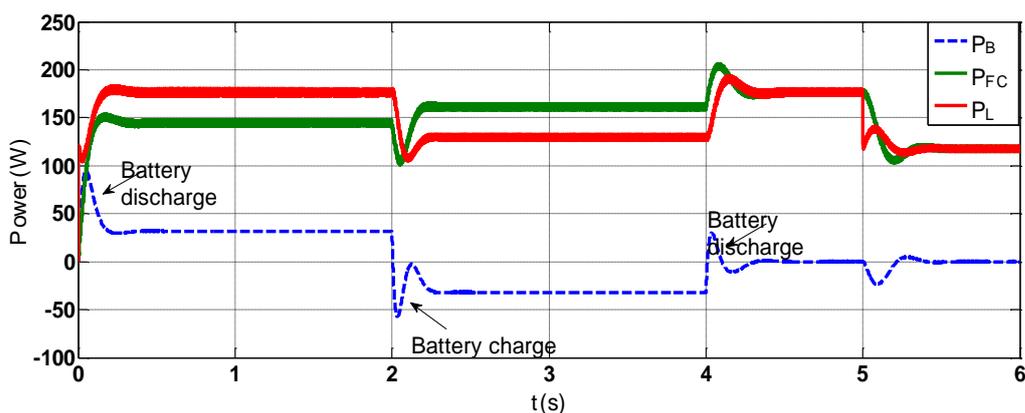


Fig.4.4. Puissances des différentes sources de la structure hybride PàC/Batterie

La Fig.4.4 montre les puissances de la PàC et de la batterie utilisée dans la source hybride multi sources multi convertisseurs en considérant les variations de la charge. Cette figure est intéressante car elle reflète exactement le scénario proposé et explique le rôle de chaque source embarquée. La batterie alimente la

charge quand la PàC n'en est pas capable seule. Autrement dit, dans le démarrage du système et dans les phases transitoires.

A partir de la Fig.4.4, il est clair aussi que la batterie fournit la puissance demandée pour le démarrage du système. Alors que la PàC prend le relais progressivement pour devenir la source principale à l'état d'équilibre. Pour la période $t = 0 - 2s$, la PàC alimente la majorité de l'énergie aidée par la batterie afin de couvrir l'énergie demandée par la charge. Quand $t = 2s - 4s$, la charge est alimentée par la PàC puisque la batterie est déchargée. De plus, durant cette période, l'excès de l'énergie fournie par la PàC est utilisé pour charger la batterie. A $t = 4s - 6s$, seule la PàC fournit l'énergie pour satisfaire la demande en puissance à la charge dans la phase permanente alors que la batterie est sollicitée dans les phases de transition $t = 2s, 4s, 5s$, quand la batterie est sollicitée. Nous rappelons que la batterie peut délivrer l'énergie non seulement dans les transitions mais aussi dans les phases permanentes quand la PàC ne peut pas alimenter la charge. Ceci permet d'augmenter la durée de vie de la PàC et diminue la consommation de l'hydrogène.

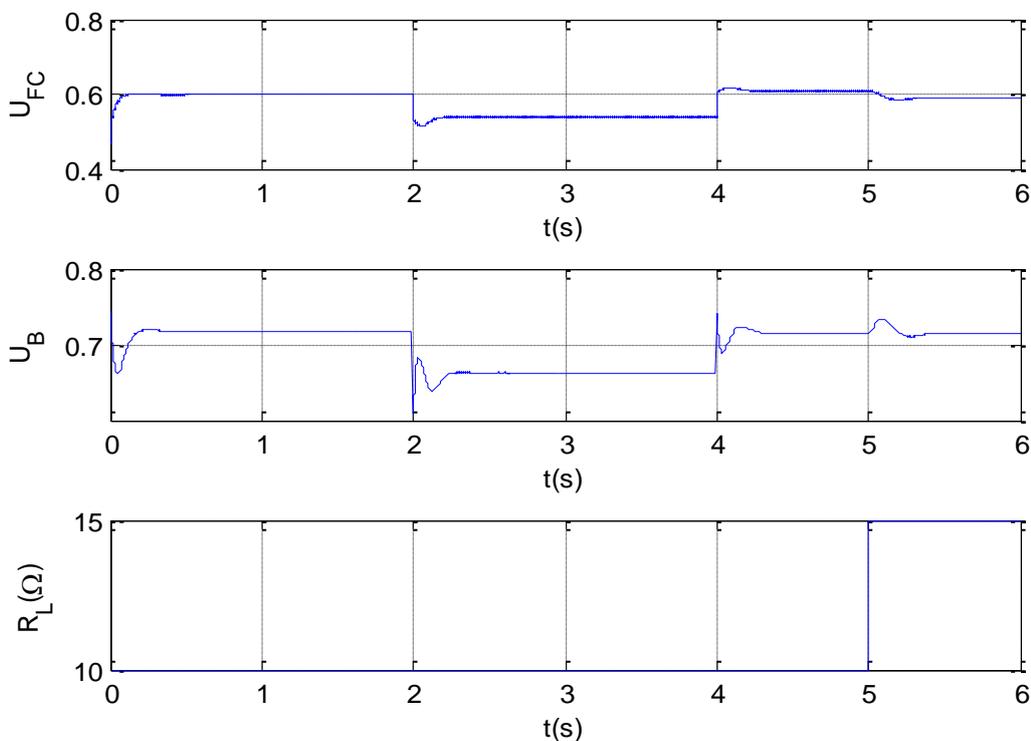


Fig.4.5. Résultats de la simulation : (haut) contrôle de la PàC, (milieu) contrôle de la batterie et (bas) variation de la résistance de la charge.

La Fig.4.5 présente les courbes des signaux de la commande du convertisseur élévateur de la PàC u_{FC} , du convertisseur élévateur/abaisseur de la batterie u_B ainsi que la variation appliquée à la résistance de la charge (l'inductance L et la F.E.M sont inchangées).

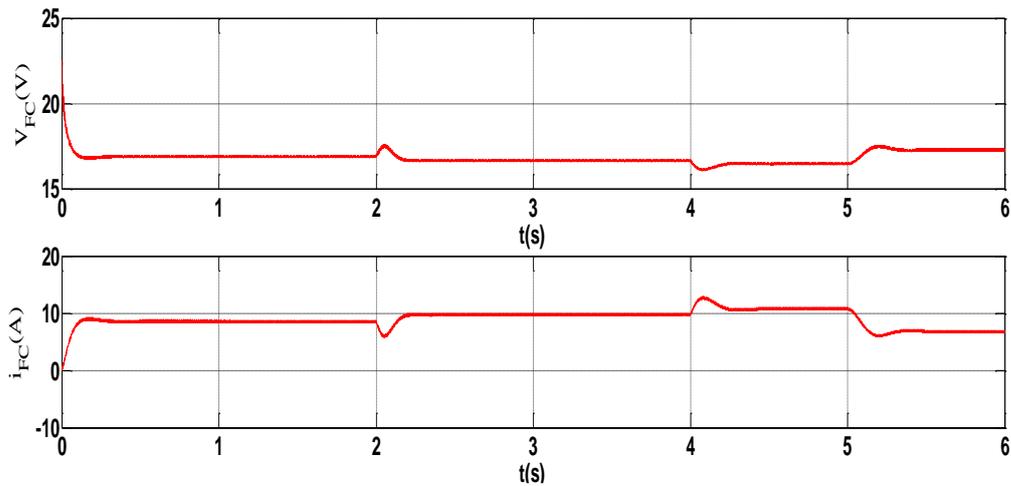


Fig.4.6. Comportement électrique de la PàC: la tension (haut) et le courant (bas)

La Fig.4.6 illustre le comportement électrique de la PàC selon la demande en puissance de la charge. Les courbes du courant et de la tension de la PàC montrent un démarrage lisse de la PàC, qui est due à la réponse lente des auxiliaires du système PàC. Ce comportement est compensé par la batterie qui assure la puissance manquante durant le démarrage

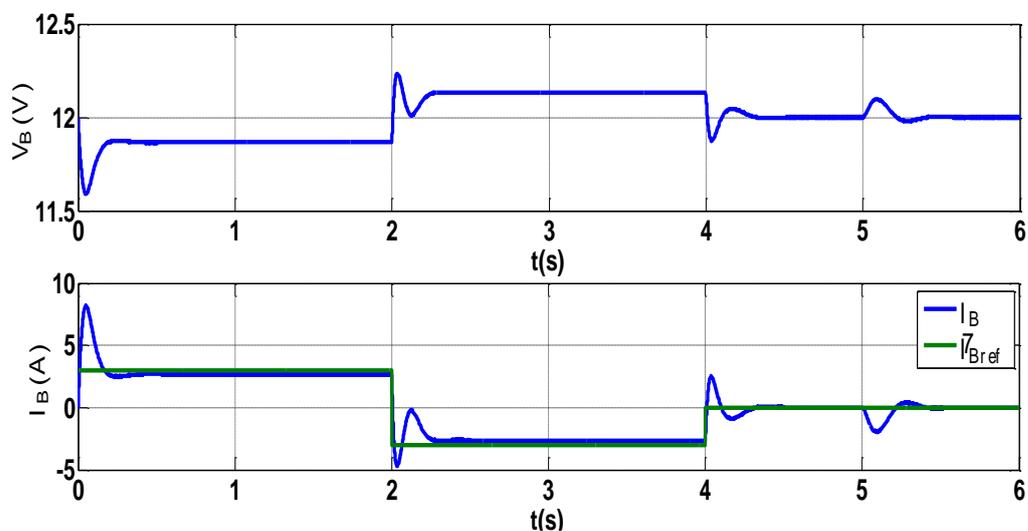


Fig.4.7 Comportement électrique de la batterie : la tension (haut) et le courant (bas)

Le courant et la tension de la batterie sont montrés dans la Fig.4.7. Ils montrent la sollicitation de la batterie dans les phases transitoires ainsi que lorsque la PàC n'est pas capable d'alimenter seule la charge. A savoir, dans le démarrage, dans les phases de transition et même lors d'une défaillance de la PàC, selon la variation de la tension du bus DC. La courbe du courant de la batterie montre plusieurs cas de sollicitation de la batterie. Au démarrage, le courant de la batterie augmente, ce qui montre que cette dernière fournit de l'énergie pour le démarrage du système. Durant la période $t =]0 - 2s[$, le courant de la batterie est positif ce qui implique que la batterie fournit l'énergie à la charge. A $t = 2s$, le courant de la batterie diminue rapidement (décharge de la batterie) jusqu'à la valeur -3A et reste négatif jusqu'à

l'instant $t = 4s$. Cependant, à cet instant, le courant augmente jusqu'à une valeur positive (recharge de la batterie) après il tend vers zéro (son point d'équilibre), ce qui signifie que la batterie n'est pas sollicitée et c'est la PàC qui alimente seule la charge. Les courbes de la Fig.4.5 montrent que la batterie peut fournir l'énergie non seulement dans les phases transitoires ($t = 2s, 4s, 5s$) mais aussi dans les phases permanentes $t = 0s - 2s$.

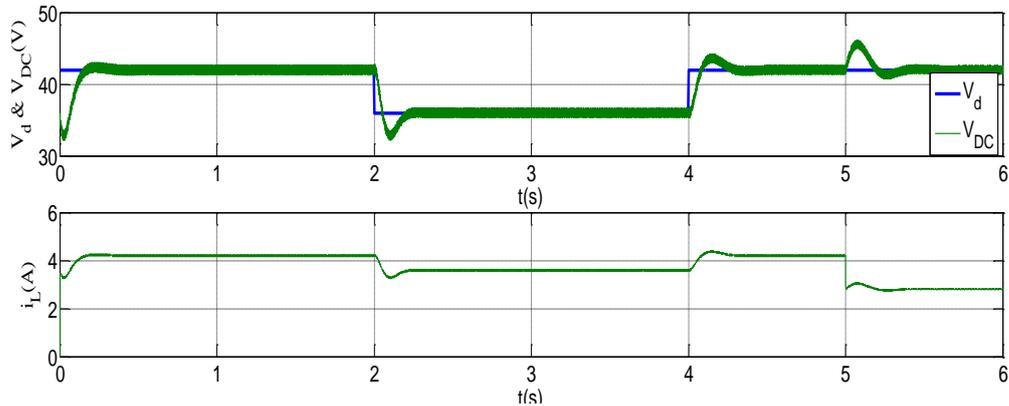


Fig.4.8. Tension de bus et sa consigne (haut), le courant de la charge (bas)

La Fig.4.8 présente la réponse du système à un échelon de la tension désirée de bus DC. Il est clair que la tension du bus suit sa référence. Un léger dépassement est observé lors des phases transitoires, par exemple à $t = 2s$.

4.4.1.4 Validation expérimentale

Cette section présente l'implantation de la stratégie de contrôle fondé sur la passivité en temps réel. Le banc d'essai a été développé à State Key Laboratory of Industrial Control Technology, à l'université de Zhejiang (Hangzhou, en Chine). Le banc d'essai conçu pour cette étude est montré dans la Fig.4.11 et son objectif est de valider le scénario choisi, c'est-à-dire d'asservir la tension de bus vers sa référence et le courant de la batterie vers sa référence optimale en fonction de son état de charge (calculé avec le modèle de Coulomb Counting), d'étudier le rôle des sources utilisées et le contrôle de la distribution de la puissance entre les différents éléments.



Fig.4.9 convertisseur (gauche), pack de batteries (droite)

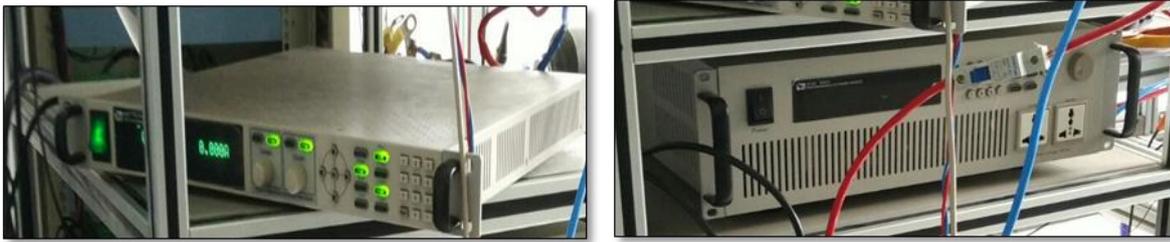


Fig.4.10 source de puissance (gauche), charge (droite)

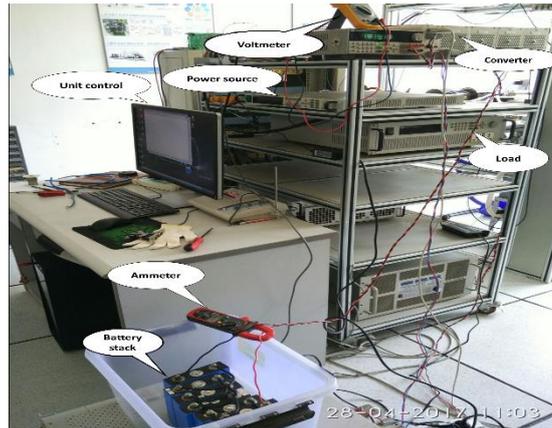


Fig.4.11 Vu de l'ensemble du Banc d'essai d'hybridation PàC/Batterie réalisé à l'Université du Zhejiang

Le banc d'essai (Fig.4.11) mis en place pour la source hybride PàC et batterie commandée par IDA-PBC a été conçu pour cette étude est composé de :

- Une source de puissance émulant le comportement de la PàC, connectée au bus DC à travers un convertisseur élévateur DC/DC.
- Un pack de batterie de 6 cellules de 3.2 V connectées en série (la capacité de chacune est de 36Ah).
- Une charge électrique émulant la demande en puissance.
- Deux convertisseurs pour la source de puissance et les batteries.
- Des appareils de mesures.
- Logiciel LabView avec la carte d'acquisition de type DAQ MX.

Une interface homme-machine sur LabView est développée afin d'appliquer des variations en temps réel. Le courant de référence de la batterie qui est calculé ainsi que la tension de bus DC désirée sont modifiés en ligne sous LabView. L'état de charge de la batterie est pris en considération dans le scénario de cette étude qui consiste à contrôler les deux convertisseurs afin d'asservir la tension de bus. En effet, selon l'état de charge de la batterie, cette dernière peut alimenter la charge dans les phases permanentes en plus de sa sollicitation pour fournir et/ou absorber les pics de puissance.

Dans un premier temps, le test de cette expérimentation consiste en une poursuite de la tension de référence du bus DC ainsi que le courant de référence de la batterie en modifiant le gain de réglage r (amortissement artificiel de la commande IDA-PBC). Dans une seconde étape, une variation de l'état de charge de la batterie est émulée et la commande devra réagir et gérer au mieux cette limitation en ressource.

Table.4.2. Principales caractéristiques d'une cellule de batterie utilisée.

Batterie	Type	LiFePO ₄		
	Capacité nominale	36 Ah		
	Tension nominale	3.2 V		
	Tension max et min	3.7-2.5 V		
	Courant standard de charge et de décharge	10.8 A		
	Température du fonctionnement (°C)	Charge	0 – 45	
		Décharge	-25 – +55	
Cycle de vie	> 2000 fois			

- Résultats obtenus expérimentalement :

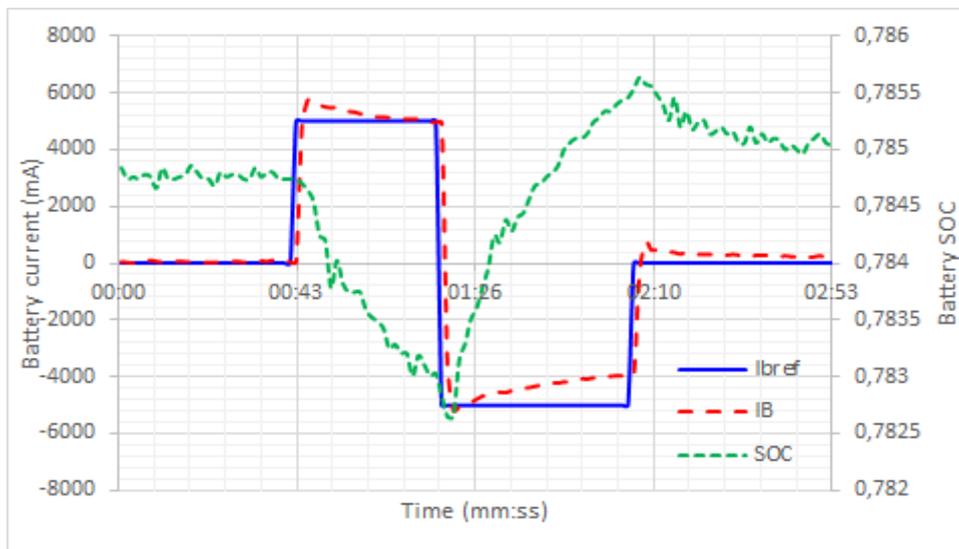


Fig.4.12 Courant de la batterie et sa référence en considérant l'état de charge actuel de la batterie.

La Fig.4.12 présente le contrôle du courant de la batterie selon son état de charge. Cette figure montre clairement que le courant de la batterie suit bien sa référence avec un léger dépassement observé en particulier dans les phases transitoires. Il est clair aussi qu'au démarrage, la batterie étant chargée à un état de charge de 78,5%, elle n'est pas sollicitée (le courant de la batterie est nul) jusqu'à $t = 00:43$. Après cela et pendant, $t = 00:43 - 01:21$ la batterie fournit la puissance à la charge conduisant ainsi entre temps à la diminution de son état de charge. Durant l'intervalle $t = 01:21 - 02:10$ la PàC charge la batterie et cela est montré clairement dans l'augmentation de la valeur de l'état de charge de la batterie. Après, le courant de la batterie est égal à zéro ce qui implique que la batterie n'est pas sollicitée et la valeur de son état de charge revient autour de sa valeur initiale (c'est à dire 78,5%).

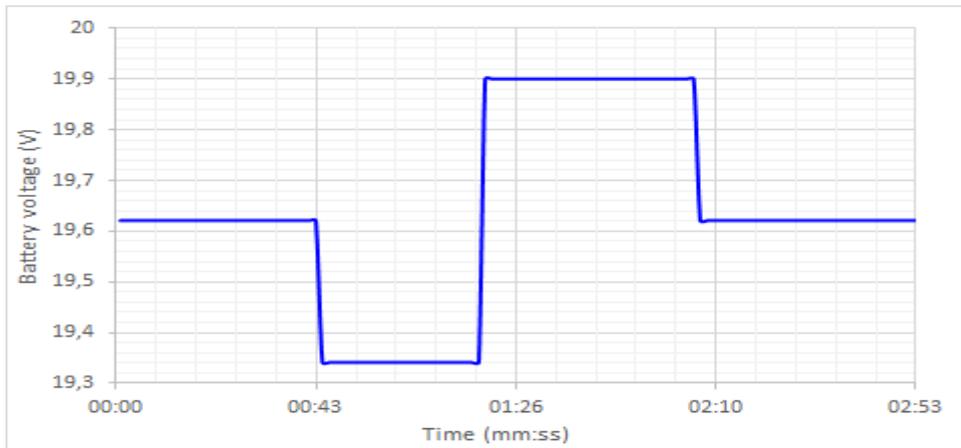


Fig.4.13. Résultat expérimental de la tension de la batterie

La Fig.4.13 illustre le comportement de la tension fournie par la batterie selon les différents modes du fonctionnement :

Le mode normal et le mode de décharge. Au début, la tension de la batterie est autour de 19.6V jusqu'à $t = 00:43$. Dans l'intervalle $t = 00:43 - 01:21$, comme mentionné dans la Fig.4.12, le niveau du SOC émulé est abaissé afin de voir le comportement de la commande lorsque la batterie se décharge. Ceci est traduit par l'augmentation du courant de la batterie ainsi que sa référence et la diminution de la tension jusqu'à 19.3V (la batterie fournit la puissance à la charge). Après cela, la batterie est chargée par la PàC qui se traduit par l'augmentation de la tension de la batterie jusqu'à la valeur 19.9V. Par la suite, la batterie aide la PàC pour alimenter la charge ce qui implique la diminution de la valeur de la tension de la batterie à 19.6V.

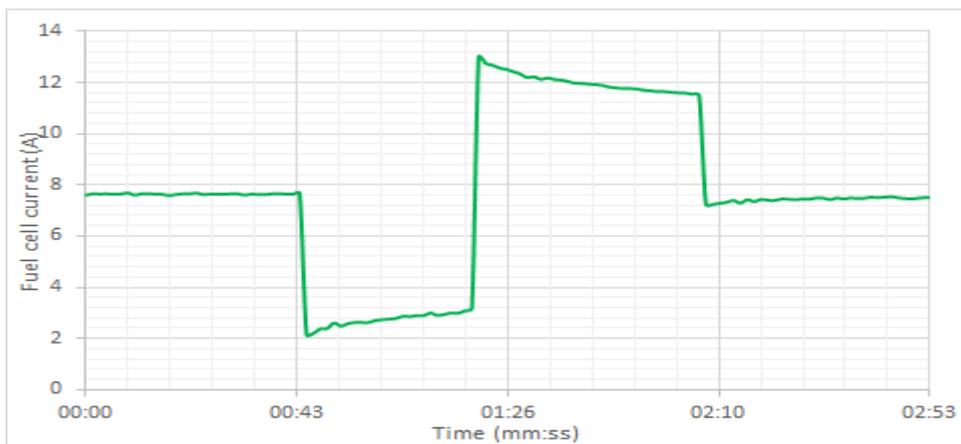


Fig.4.14. Courant de la PàC

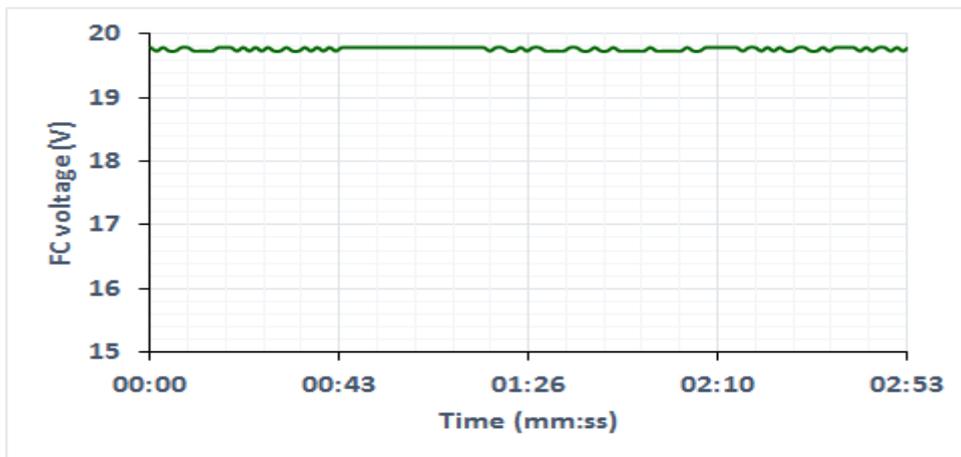


Fig.4.15. Tension de la PàC

Le comportement électrique de la PàC est indiqué à travers le courant fournie et la tension qui sont reportés sur les Fig.4.14 et 4.15, respectivement. La courbe du courant de la PàC (Fig.4.14) illustre les sollicitations de la PàC. Par exemple, au début, la PàC alimente seule la charge et son courant est autour de 8A. A $t = 00:43$, la batterie alimente la charge, ce qui provoque la diminution du courant de PàC jusqu'à la valeur de 2 A. Ensuite, la batterie est déchargée, donc la PàC devra alimenter la charge et en même temps recharger la batterie, ici le courant de la PàC atteint une valeur de 12A. Dans la dernière phase, le courant de la PàC est égal à sa valeur initiale de 8A. La tension de PàC est autour de 20V durant tout le cycle (Fig.4.15).

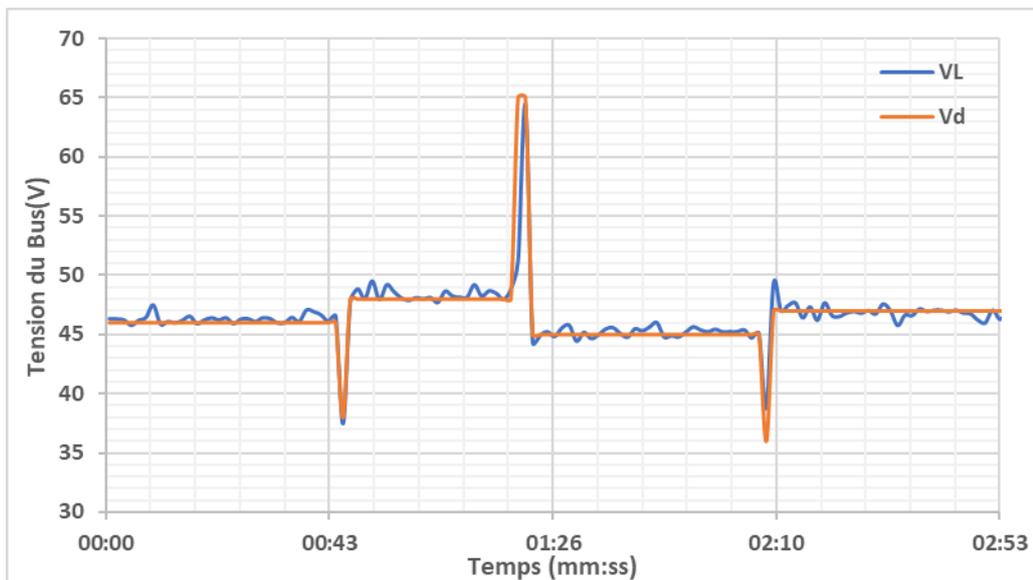


Fig.4.16 Tension du bus et sa référence

La tension du Bus DC et sa référence sont reportées sur la Fig.4.16 et indique que la tension de la charge ou la tension du bus DC suit bien sa référence. Comme le montre cette figure, la stratégie du contrôle

proposée garantit le suivi de la tension de sortie (tension de bus) à sa consigne dans les différents modes y compris au moment de la variation de la charge par exemple à $t = 00:43$.

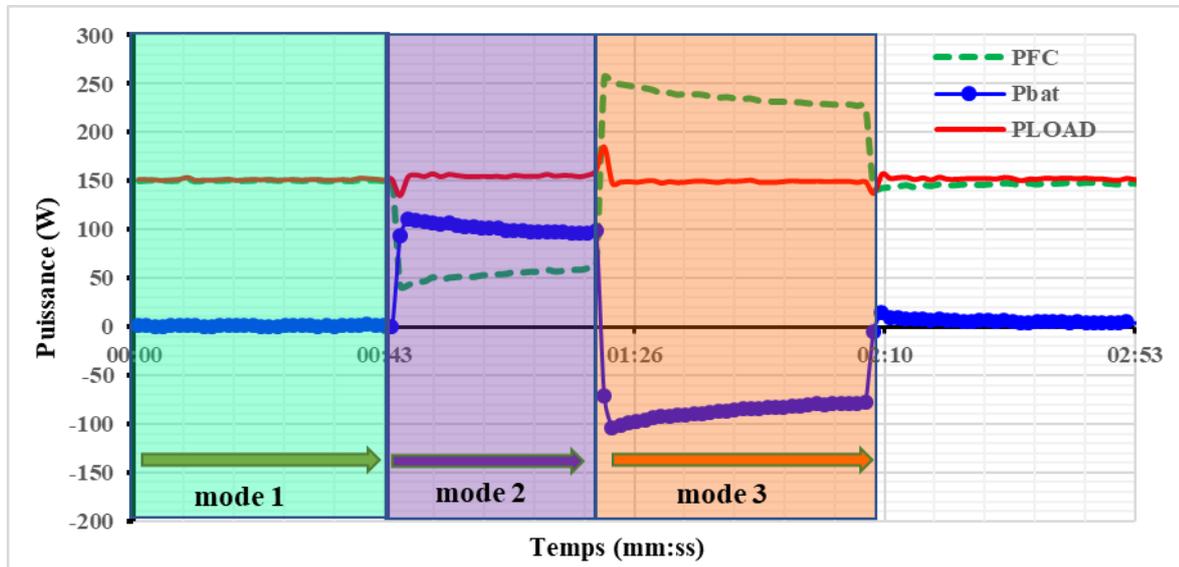


Fig.4.17. Résultats expérimentaux des puissances des sources utilisées (charge, PàC et la batterie).

Les puissances des sources utilisées dans cette étude sont illustrées dans la Fig.4.17, cette dernière est bien expliquée par l'organigramme montré dans la Fig.4.18. Dans ce travail, la demande de la charge est satisfaite par la PàC et la batterie, de telle façon $P_{Load} = P_{FC} + P_{Bat}$. Selon le scénario proposé et l'état de charge de la batterie, plusieurs modes peuvent être notés. Quand la puissance de la charge est supérieure à celle de la PàC, la batterie doit être utilisée avec la PàC pour couvrir la demande de la charge (si l'état de charge de la batterie est suffisamment élevé), ce qui correspond au mode 2. Sinon la demande n'est pas satisfaite. Dans le cas contraire, lorsque la puissance de la charge est inférieure à la puissance de la PàC, celle-ci peut alimenter la charge et en même temps charger la batterie, dans ce cas, on est dans le mode 3. Si la batterie est chargée, la charge est alimentée par la PàC et la batterie ce qui donne le mode 2. Enfin, le mode 1 est obtenu quand la puissance de la PàC est égale à celle de la charge, la batterie n'est pas sollicitée.

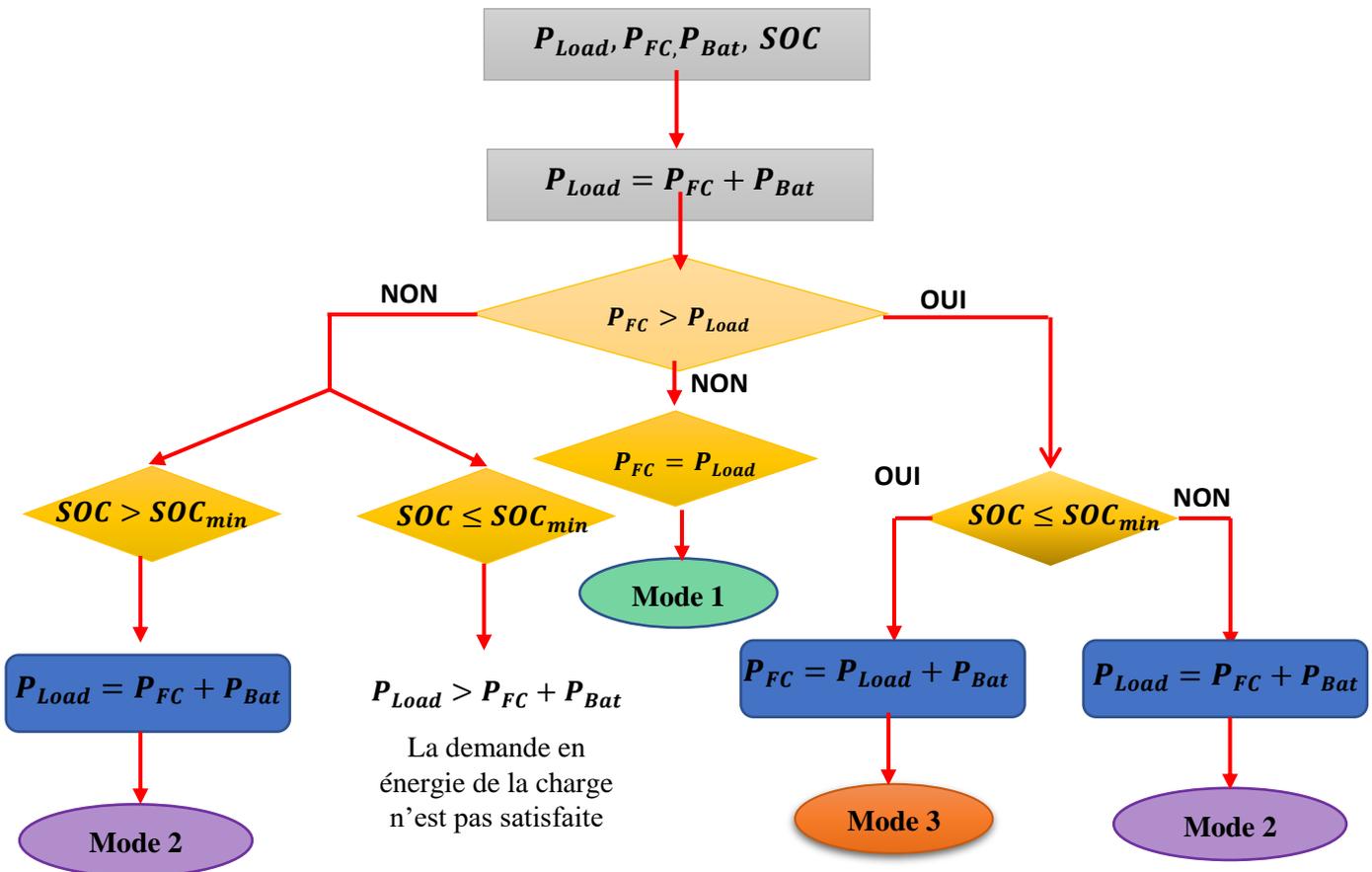


Fig.4.18. Organigramme du contrôle proposé pour la source hybride P2C/Batterie

Pour cette étude, l'IDA-PBC est utilisée pour concevoir un contrôle non-linéaire de la distribution de la puissance entre les sources embarquées. Les résultats obtenus de l'expérimentation et de simulation montrent que le contrôle proposé est correct et efficace. Ceci est clairement démontré dans les courbes obtenues qui reflètent le scénario proposé. Ce travail était présenté dans la conférence ISSH2'17 et a été publié dans [9]

4.4.2 Source hybride P2C/Supercondensateur

L'idée principale de cette section est d'étudier le contrôle du système hybride composé de P2C et SC en utilisant la stratégie du contrôle non-linéaire fondé sur la passivité (PBC). La structure étudiée dans cette section est celle indiquée dans la section 3.3. Donc, le système proposé est d'ordre 5 :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = [i_{FC}, V_{DC}, i_{SC}, V_{SC}, i_L]^T$$

4.4.2.1 Formulation du problème

L'objectif principal de cette étude est le contrôle de la puissance demandée par la charge en contrôlant la tension du bus DC à travers le convertisseur DC/DC de la P2C et le convertisseur DC/DC bidirectionnel en courant du SC. De plus, la tension du SC et par conséquent l'état de charge est contrôlé à sa valeur nominale. Dans ce travail, la P2C devra assurer la majorité de la demande en énergie de la charge dans la

phase permanente. Cependant, le rôle du SC, en tant que source auxiliaire de puissance, sera d'alimenter la charge dans les phases transitoires. La production d'énergie excédentaire ou la récupération d'énergie de freinage peut être stockée dans le SC. Pour atteindre ces objectifs, la méthode IDA-PBC est proposée pour la gestion de l'énergie. Comme déjà vu pour le système PàC/batterie les mêmes étapes seront développées pour ce système.

Les trajectoires d'équilibre pour ce système sont calculées afin d'assurer le comportement souhaité du système. Quand le régime permanent est atteint, la charge doit être alimentée seulement par la source continue (PàC). Donc, le contrôleur doit maintenir la tension du bus DC à une valeur constante et le courant du SC doit être nul. Durant les transitoires, la PàC a besoin d'avoir un comportement lisse (sans un pic de puissance significatif), tandis que le SC délivre en régime transitoire la puissance à la charge. De plus, à l'équilibre le SC doit se charger et son courant doit être égal à zéro en régime permanent (en absence de pics).

Avec la même procédure de calcul abordé dans la section 4.2.1.1, les trajectoires d'équilibre sont données

comme suit : $\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5]^T = [\bar{x}_1, V_d, \bar{x}_3, V_{SC}^d, \frac{V_d - E_L}{R_L}]^T$

$$\bar{\mu}_1 = \frac{V_{fc}}{\bar{x}_2} ; \quad \bar{\mu}_2 = \frac{V_{SC}^d}{\bar{x}_2} \quad 4.31$$

V_{SC}^d représente la tension nominale du SC à l'équilibre.

\bar{x}_1 et \bar{x}_3 sont définis selon le scénario choisi.

4.4.2.2 Représentation PCH et loi de commande IDA-PBC

La fonction d'énergie désirée en boucle fermée est celle donnée par :

$$H_d = \frac{1}{2} \tilde{x}^T Q \tilde{x} \quad 4.32$$

Le système d'équations en fonction de la dynamique d'erreur est comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_2 + V_{FC} - \mu_1 \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \frac{1}{C_{DC}} [\mu_1 \tilde{x}_1 + \mu_2 \tilde{x}_3 - \tilde{x}_5 + \mu_1 \bar{x}_1 - \bar{x}_5 + \mu_2 \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_3 &= \frac{1}{L_{SC}} [-\mu_2 \tilde{x}_2 + \tilde{x}_4 - \bar{x}_4 - \mu_2 \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_4 &= -\frac{1}{C_{SC}} [\tilde{x}_3 - \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 &= \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_2 - R_L \tilde{x}_5 + \bar{x}_2 - R_L \bar{x}_5 - E_L] \end{aligned} \quad 4.33$$

La représentation du système d'équations ci-dessus en fonction du gradient de l'énergie désirée H_d peut-être écrit comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = [J - R] \nabla H_d + \xi(\bar{x}, \mu, \bar{\mu}) \quad 4.34$$

$$\text{Avec : } [J-R] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-\mu_1}{C_{DC}L_{FC}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_1}{C_{DC}L_{FC}} & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & \frac{-1}{C_{DC}L_L} \\ 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & \frac{1}{C_{DC}L_{SC}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{DC}L_L} & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L} \end{bmatrix}; \nabla H_d = \begin{bmatrix} L_{FC}\tilde{x}_1 \\ C_{SC}\tilde{x}_2 \\ L_{SC}\tilde{x}_3 \\ C_{CS}\tilde{x}_4 \\ L_L\tilde{x}_5 \end{bmatrix}; \zeta(\bar{x}, \mu, \bar{\mu}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{FC}}(V_{FC} - \mu_1\bar{x}_2) \\ \frac{1}{C_{DC}}(\mu_1\bar{x}_1 - \bar{x}_5 + \mu_2\bar{x}_3) \\ \frac{1}{L_{SC}}(\bar{x}_4 + \mu_2\bar{x}_2) \\ \frac{-1}{C_{SC}}\bar{x}_3 \\ \frac{1}{L_L}(\bar{x}_2 - R_L\bar{x}_5 - E_L) \end{bmatrix}$$

Les lois du contrôle suivantes sont proposées :

$$\begin{cases} \mu_1 = \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = \bar{\mu}_2 - r\tilde{x}_3 \end{cases} \quad 4.35$$

Où r est un paramètre positif qui permet d'ajuster l'amortissement du système. Une valeur élevée de r augmente considérablement l'amortissement au détriment de la rapidité du système. Un compromis doit être fait pour le bon choix de ce paramètre. Le choix de μ_1 permet de contrôler la tension du bus DC malgré la variation de la tension PàC et le choix de μ_2 permet de contrôler le courant du SC x_3 et la tension du SC à leurs valeurs souhaitées ou nominales, respectivement.

L'origine du système PCH en boucle fermée avec les lois de contrôle choisies et la fonction d'énergie radialement non bornée est globalement stable.

Preuve : la dynamique en boucle fermée du système PCH (4.36) avec les lois de contrôle (4.35 et 4.31) et la fonction d'énergie radialement bornée (4.32) est :

$$\dot{\tilde{x}} = [J(\mu) - R']\nabla H_d \quad 4.36$$

$$\text{Où } R' = \text{diag} \left\{ 0; 0; \frac{rV_d}{L_{SC}^2}; 0; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = R'^T \geq 0$$

La dérivée de la fonction d'énergie désirée le long de la trajectoire (4.36) est :

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{\tilde{x}} = -\nabla H_d^T R' \nabla H_d \leq 0$$

Le schéma bloc suivant récapitule le principe de la méthode IDA-PBC pour le système PàC/SC :

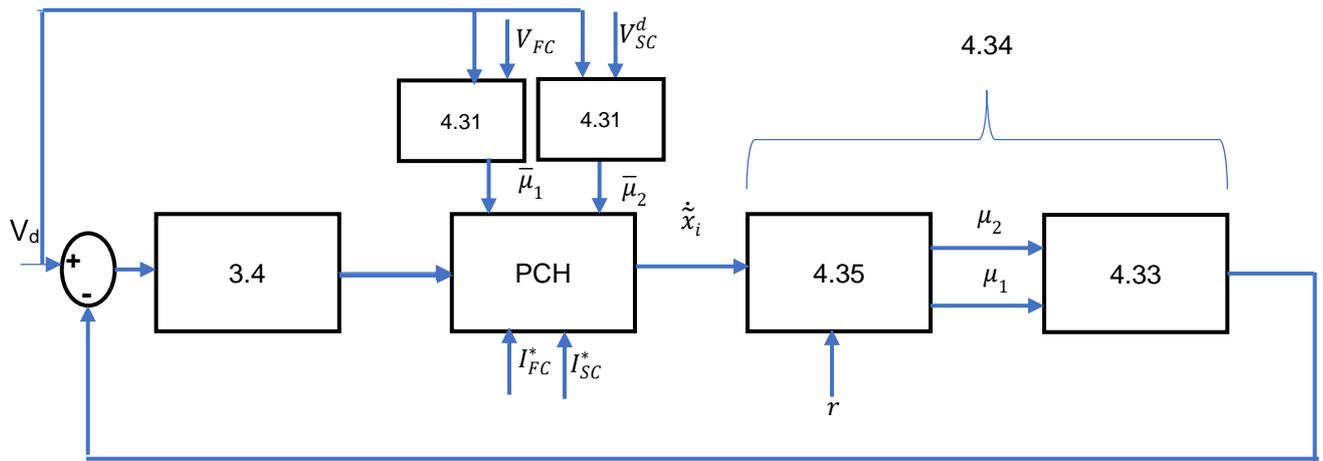


Fig.4.19 Structure globale IDA-PBC de la source hybride étudiée PàC/SC

4.4.2.3 Résultats de simulation

Les représentations sous forme d'équations d'état et le contrôle proposé sont directement intégrés dans l'environnement Matlab/Simulink. Une simulation moyenne de 6 secondes est réalisée. Dans ce qui suit, nous illustrons les résultats obtenus en appliquant la commande IDA-PBC pour un système composé de PàC, SC et une charge (pour la structure montrée dans la Fig.3.2). Ces résultats permettent d'évaluer et de valider la faisabilité de la commande choisie pour le système hybride étudié. Étant donné que les valeurs des paramètres utilisés dans ces simulations sont proches de celles utilisés dans le système précédent, seuls les paramètres du SC sont reportés dans le tableau.4.3.

Tableau.4.3. Paramètres du SC utilisés dans la simulation

SC	L_{SC}	C_{SC}	V_{SC}^d
	0.008H	3500/6 F	12V

La réponse à des échelons de la tension du bus DC de référence est représentée sur la Fig.4.20. (haut). La tension du bus suit correctement la tension de consigne avec des légers dépassements dans les phases transitoires, alors que dans le régime permanent, la tension du bus suit sa référence sans dépassement avec une erreur presque nulle.

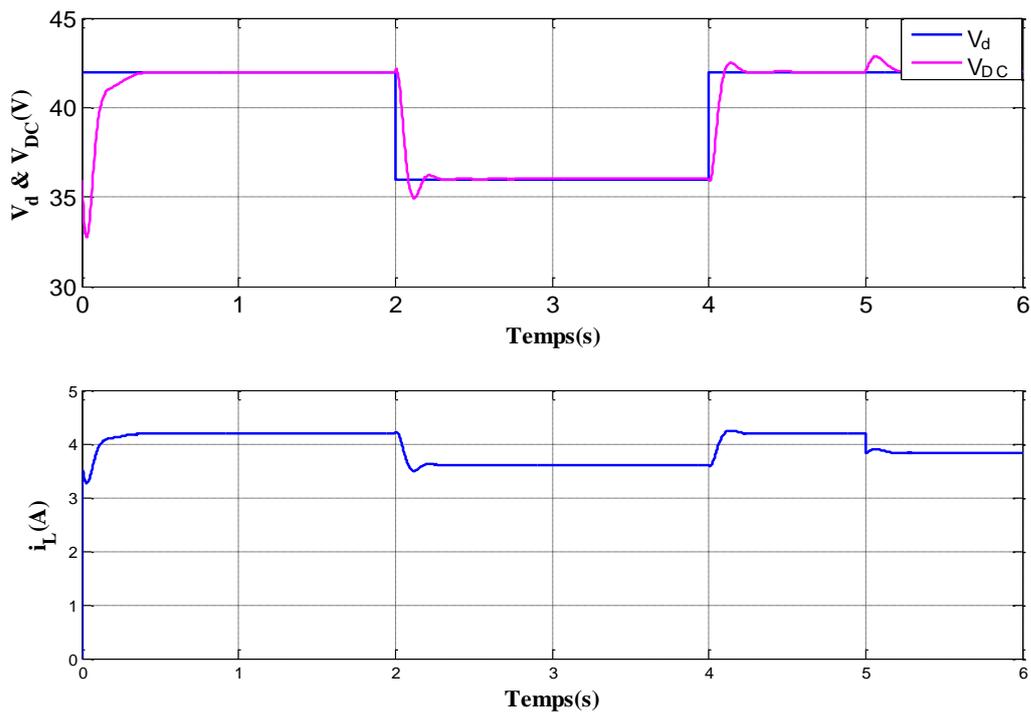


Fig.4.20 Résultats de simulation de l'évolution du temps de la tension de bus DC V_{DC} et sa référence V_d (Haut) et le courant de la charge i_L (bas).

Le courant de la PàC illustré dans la Fig.4.21 (bas) montre que la PàC n'alimente pas la charge au démarrage en raison de son temps de réponse. Après, elle fournit seule l'énergie à la charge avec un courant qui est de l'ordre de 11A dans la première région ($t \in]0 - 2s[$), 7A dans la deuxième région ($t \in]2 - 4s[$), et il revient à ($I_{PàC} \sim 9A$) dans la dernière phase. Cependant, dans les phases de transition telles qu'à $t = 2s, 4s, 5s$, le SC aide la PàC pour absorber ou fournir les pics de puissances. Tandis que la courbe de la Fig.4.21 (haut) reporte la tension de la PàC qui montre sa sollicitation dans les phases permanentes où la tension est de l'ordre de 17V.

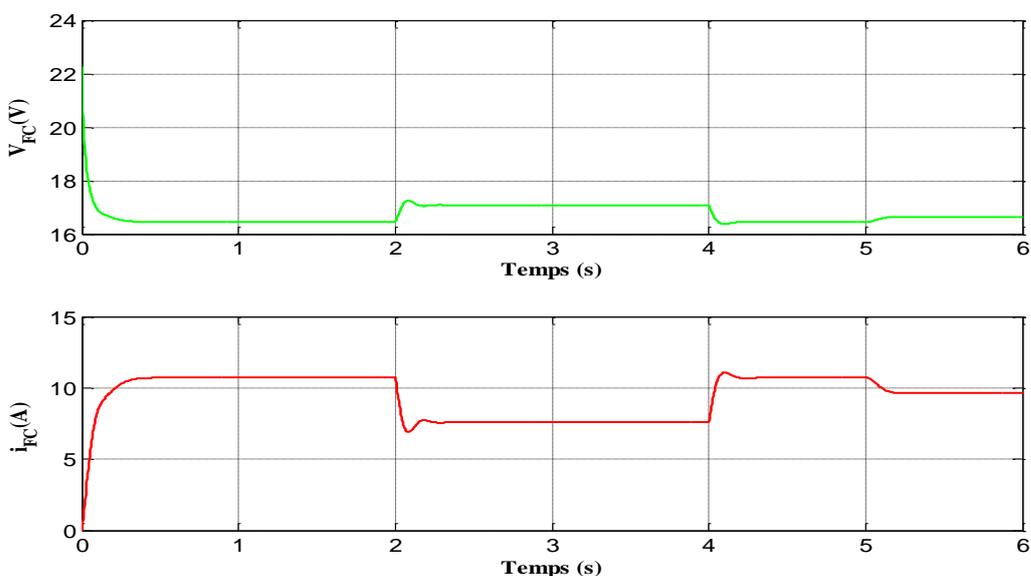


Fig.4.21 Comportement électrique de la PàC. (Haut) tension de la PàC, (bas) courant de la PàC.

Le courant et la tension du SC sont reportés sur la Fig 4.22. Au démarrage, la tension du SC est de 12V ce qui correspond à sa tension nominale. La courbe du courant du SC montre qu'il n'est sollicité que dans les phases transitoires que ce soit pour absorber ou fournir les pics de puissances ($t = 2s, 4s, 5s$) et hors de ce régime le courant du SC est nul.

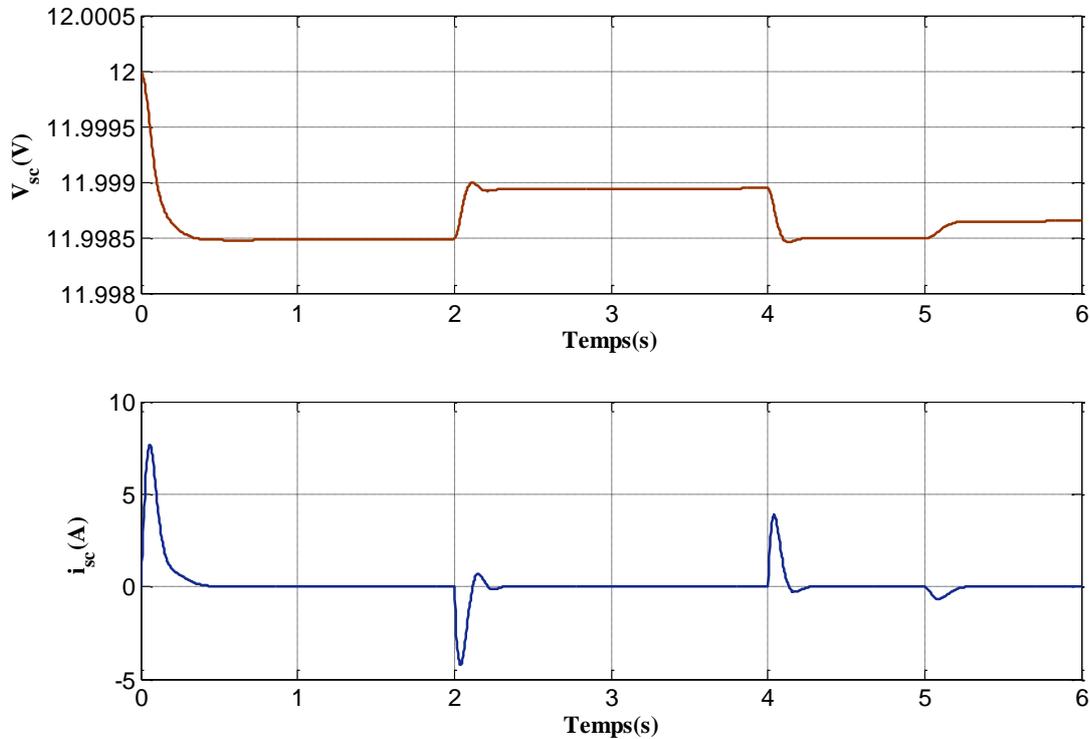


Fig.4.22 Comportement électrique du SC. (Haut) tension, (bas) courant.

La Fig.4.23 montre la distribution de la puissance entre la PàC et le SC pour alimenter la charge. Cette figure reflète le scénario proposé. Autrement dit, la PàC fournit la puissance à la charge durant le régime permanent. Tandis qu'au démarrage et durant les transitoires, c'est le SC qui absorbe/fournit les pics de puissance. En plus, la puissance maximale demandée par la charge est de l'ordre de 175W essentiellement fournie par la PàC par exemple dans la période ($t = 0.1s - 2s$). Durant l'intervalle de temps $t = 2s - 4s$, la puissance demandée par la charge est minimale et correspond à 120W.

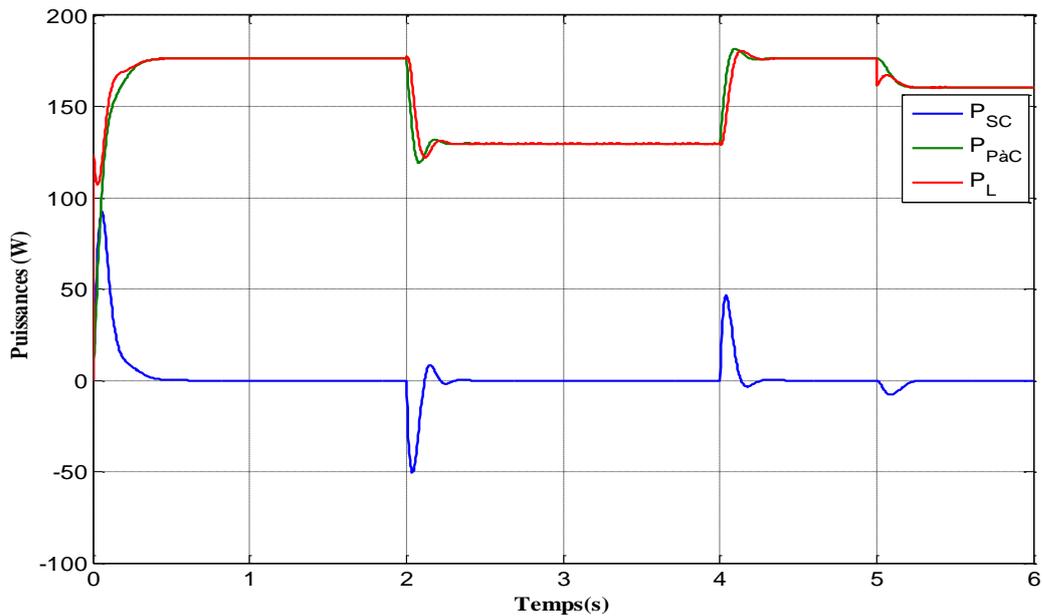


Fig.4.23 Simulation de l'évolution des puissances PàC, SC et de la charge.

4.4.2.4 Validation expérimentale

Ce travail d'expérimentation entre dans le cadre de mon séjour scientifique à l'Université du Québec trois Rivières (UQTR). Sur la base des caractéristiques de traction du véhicule électrique Nemo du banc d'essai de l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH Canada) (Fig.4.23), une validation à échelle réduite (1/60) est proposée sur une plate-forme expérimentale. A partir de la Fig.4.25, le banc d'essai est composé d'une PàC à membrane échangeuse de proton (PEM), Horizon de 500 W, de deux modules de SC de Maxwell SC, de deux hacheurs Zahn autonomes réglables de 2 kW, une capacité pour le bus DC et une charge DC programmable de 500 W pour émuler la traction du sous-système (voir Fig.4.25).

Le cycle de conduite sur une route urbaine a été obtenu avec le véhicule Nemo à l'Université du Québec à Trois-Rivières, sur le campus et aux alentours (Fig.4.24). Le cycle de conduite étudié est composé d'une séquence répétitive de phases de vitesse constante (20 m/s), d'accélération et de freinage. Il en résulte un profil de puissance de traction à pleine échelle (Fig.4.24). Dans cette section, le profil de puissance sur route est reproduit par la charge programmable avec une réduction d'échelle de 60 tout en se limitant à une demande de puissance positive. L'objectif de contrôle développé est d'alimenter le système de traction émulé tout en répartissant le flux de puissance entre la PàC et le SC.



Fig. 4.24. Véhicule hydrogène Némo

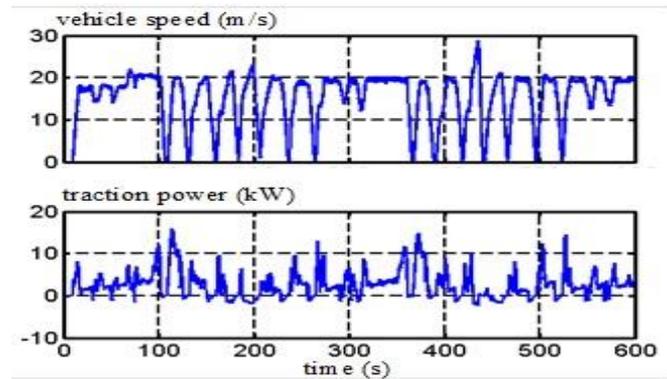


Fig. 4.25 Profils de la vitesse et de la puissance du véhicule Némo.

La charge DC programmable est choisie pour imposer le profil de puissance du véhicule Némo avec une réduction de la puissance de 1/60. De plus, les phases de freinage par récupération ne sont pas prises en compte car la charge programmable ne fournit que les puissances positives. Seul le freinage mécanique est pris en compte pour les phases de freinage. Cependant, une variation de la tension du bus DC est considérée permettant de récupérer l'excès de puissance pour recharger le pack SC. Les tensions et les courants sont mesurés avec des capteurs LEM classiques et des sondes de tension (g). Aucun filtre numérique supplémentaire n'a été ajouté. Le banc d'essai a été conçu et une interface homme-machine est développée sur LabView afin d'appliquer la méthode de contrôle choisie et les variations en temps réel.

Tel que montré sur la Fig.4.25, le contrôle proposé est implémenté sur la carte National Instrument NI PCI-6229 du logiciel LabView (h). Le système PàC (c), le SC (f) et la charge programmable (d) sont connectées ensemble par trois interrupteurs de 40A, K_{fc} , K_{sc} and K_{load} , respectivement. La gestion des interrupteurs permet trois modes de fonctionnement, qui sont :

- Mode 1 : initialisation du bus DC : K_{fc} est fermé, K_{sc} et K_{load} sont ouverts. Le convertisseur de la PàC contrôle la tension du bus DC à 40V.
- Mode 2 : charger le SC : K_{fc} et K_{sc} sont fermés. K_{load} est ouvert. Le convertisseur de la PàC contrôle la tension du bus à 40V et le convertisseur du SC contrôle le courant du SC. La PàC maintient la tension du bus DC et en même temps charge le SC jusqu'à 24V.
- Mode 3 : fonctionnement du véhicule : K_{fc} , K_{sc} , K_{load} sont fermés. La traction de la charge émulée est connectée au bus DC. La commande développée gère le système pendant le fonctionnement du véhicule.

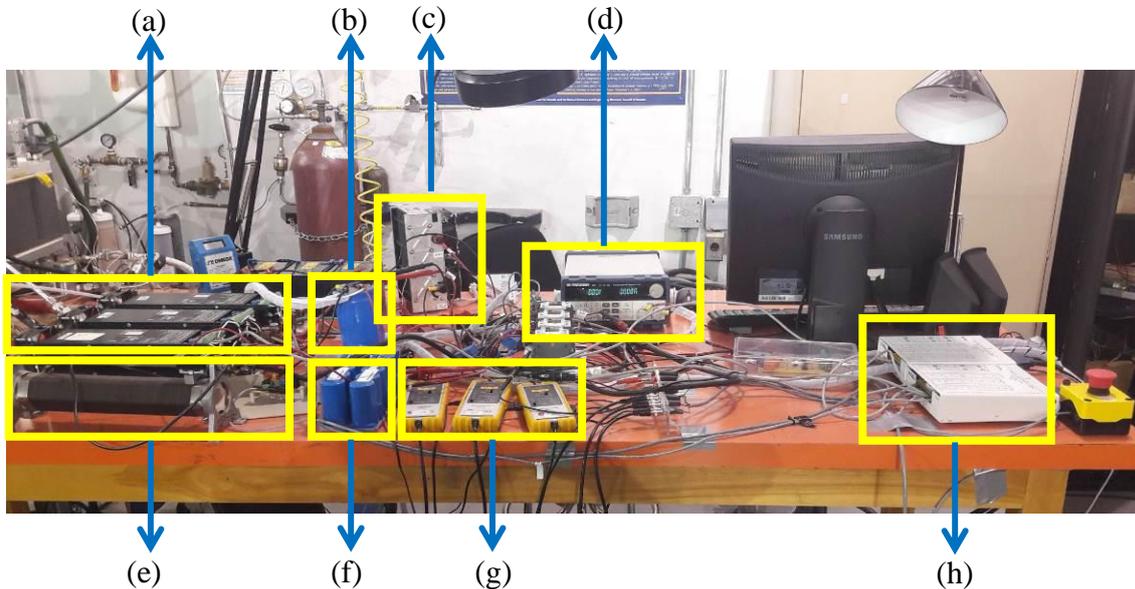
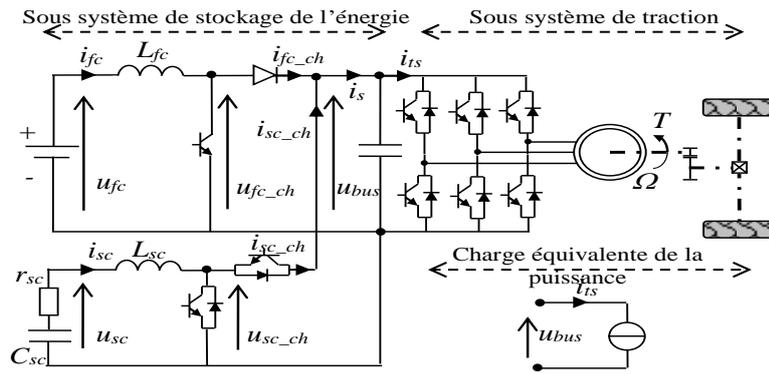
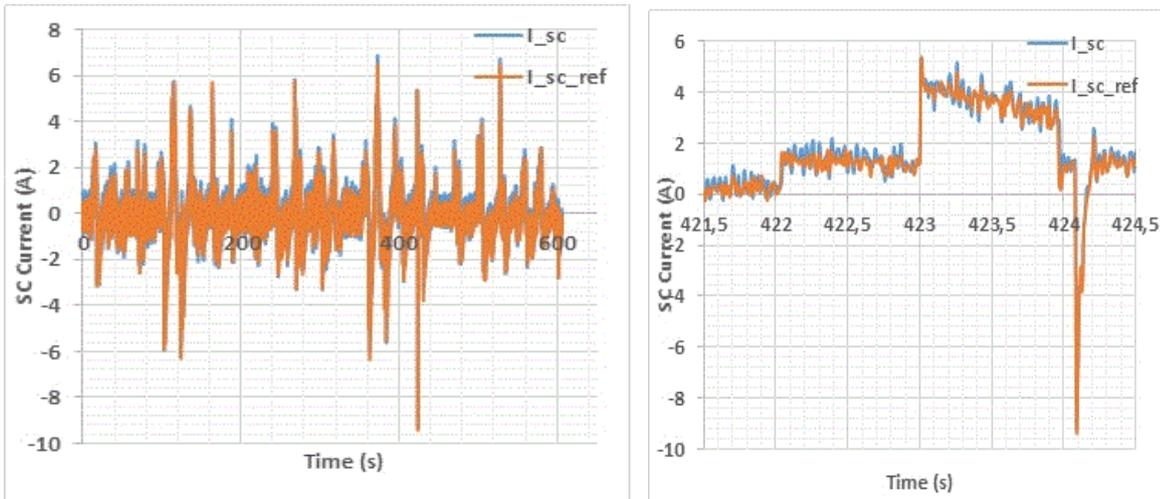


Fig.4.26. Architecture du véhicule étudié PàC/SC (haut), Plateforme expérimentale (bas)

Tableau.4.5. Paramètres du véhicule étudié

Composants du VE PàC/SC	Valeur
PàC	15-32 V / 500 W
SCs	32 V, 29 F
Capacité du Bus DC	80 V / 100 mF
Convertisseur	2 kW, contrôle en courant ou en tension
Puissance de la charge	500 W

Les résultats d'expérimentation présentent la réponse du système et le contrôle obtenu avec les lois de la commande proposées.



(a)

(b)

Fig.4.27. (a) courant du SC et sa référence ; (b) zoom sur une partie de la courbe (a)

La Fig.4.27 (a) présente le courant du SC et sa référence et montre clairement que le courant du SC suit exactement sa référence avec un dépassement presque nul et cela tout le long du trajet. Cela est montré clairement sur la Fig.4.27(b) qui correspond à un zoom sur une partie de la courbe de la Fig.4.27 (a). Il faut aussi mentionner que le SC n'est utilisé que pour absorber ou fournir la puissance transitoire.

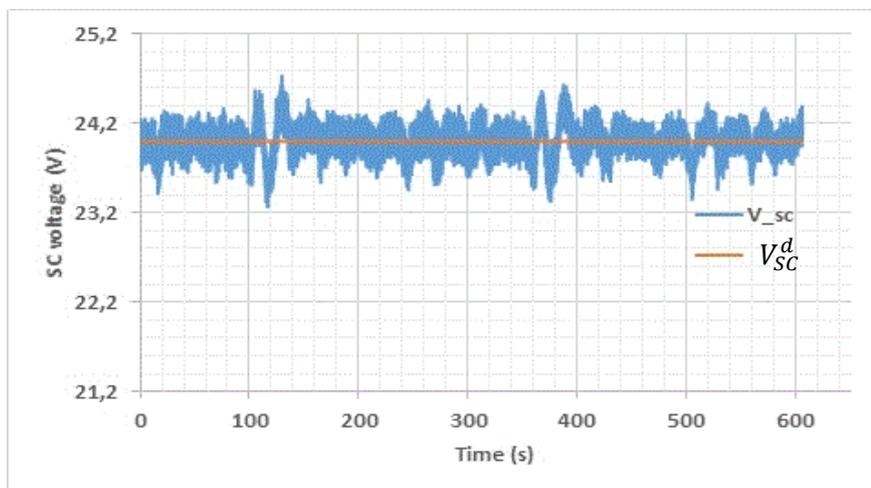


Fig.4.28 Tension du SC (V_{sc}) et sa tension désirée V_{SC}^d

La Fig.4.28 montre la tension SC et la consigne du SC. La tension SC suit assez bien sa référence, les écarts par rapport à la référence sont dus à la contribution du SC dans les phases transitoires. En effet, lorsque le SC contribue à l'alimentation de la charge (contrôle en courant), il est déchargé et par conséquent la tension diminue. En outre, s'il y a un excès de puissance, ils peuvent absorber le courant négatif et par conséquent ils sont rechargés et leur tension augmente. Cela reflète exactement le scénario imposé pour les SC.

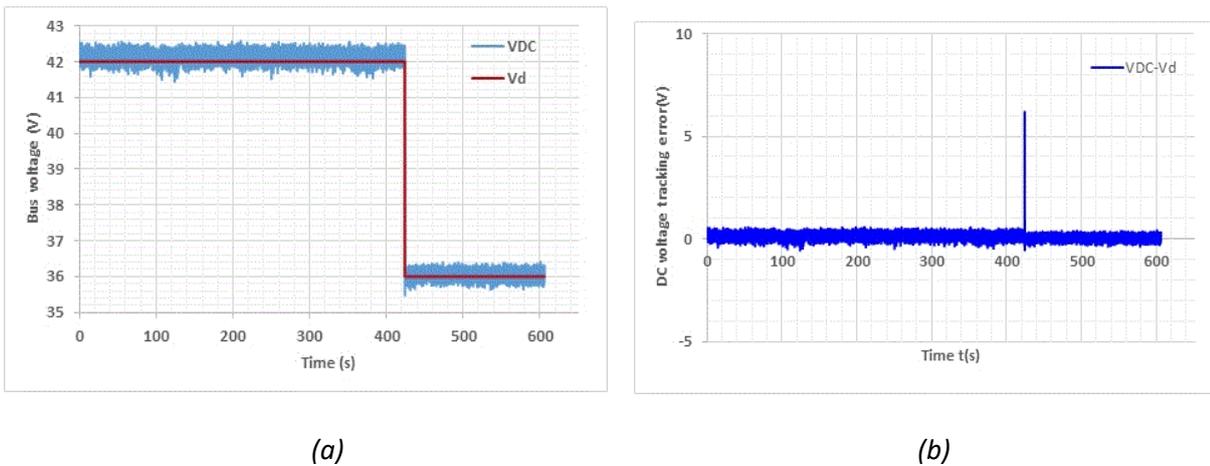


Fig.4.29 Tension du bus V_{DC} et sa référence V_d (a), erreur de contrôle de la tension (b)

La Fig.4.29 (a) présente la réponse du système à la variation d'un échelon de la tension du bus DC. La valeur de la tension du bus DC 42V correspond à une tension standard pour les automobiles. La tension du bus DC suit sa référence le long du trajet. La tension du bus est égale à 42V dans l'intervalle $t = 0 - 424s$, après un changement de la tension désirée de 42 V à 36 V est appliqué. La tension du bus DC suit rapidement sa référence avec un dépassement quasiment nul de la référence désirée illustrant la performance du contrôle IDA-PBC proposée. La Fig.4.29 (b) montre l'erreur de la tension du bus DC qui tend vers zéro.

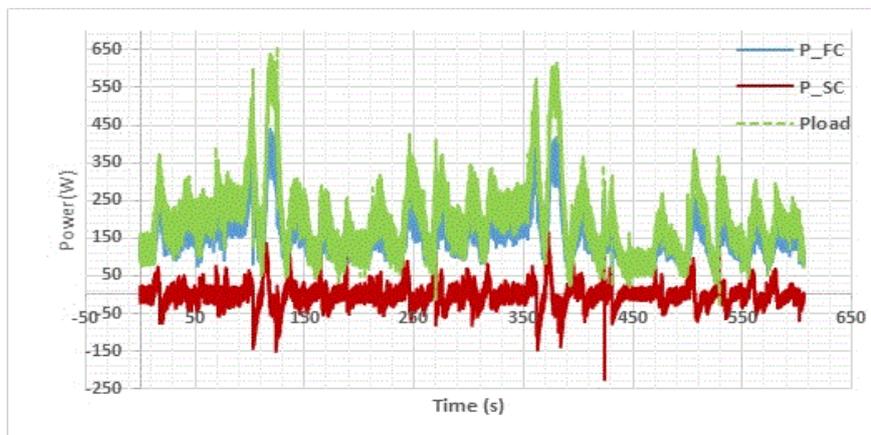


Fig.4.30 les puissances de la source hybride PàC/SC et la charge

La Fig.4.30 représente la puissance demandée par la charge, la puissance PàC et la puissance SC. On peut voir que la PàC assure la majorité de la demande de la charge. Cependant, le SC fournit et absorbe les pics de puissances dans les phases transitoires. Il est également clairement démontré que la puissance de charge est la somme des puissances SC et PàC à chaque instant. La Fig.4.31 montre aussi la décharge du SC qui correspond à la puissance négative du SC par exemple dans l'intervalle $t = 120s - 130s$, dans ce cas la PàC charge le SC. De plus, La Fig. 4.32 montre le rôle complémentaire entre la PàC et le SC pour alimenter la charge, ce qui correspond à la période comprise entre $t = 370s - 375s$ (voir Fig.4.32). Cette

figure est importante et reflète exactement le scénario proposé et illustre les avantages du contrôle de puissances entre FC, SC et la charge.

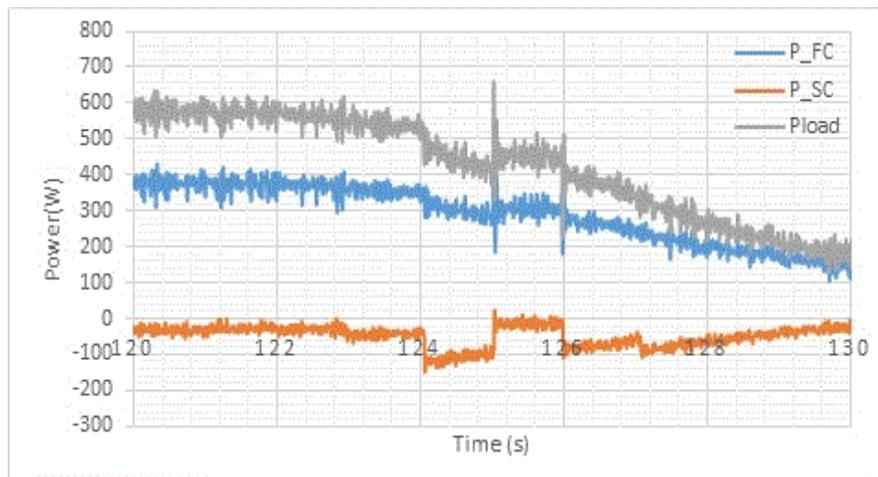


Fig.4. 31 Courbe des puissances avec les phases de recharges des SC (puissance négative)

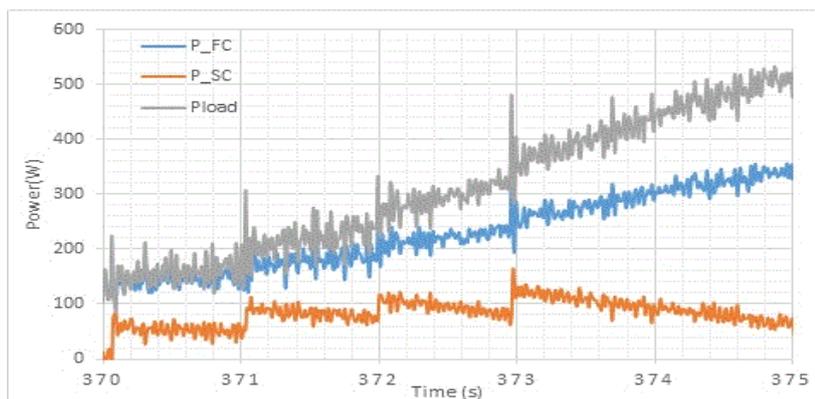


Fig.4. 32 Puissances montrant le rôle complémentaire entre la PàC et le SC

4.4.3 Source hybride PàC/Batterie/Supercondensateur

L'hybridation de la PàC avec d'autres sources de stockage permet de sous-dimensionner la PàC et d'augmenter sa durée de vie et la disponibilité des véhicules [159]. Dans cette étude, la PàC est la source principale ; la batterie et le SC sont des sources secondaires. La structure générale du système est illustrée dans la Fig.3.5. Cette structure consiste à connecter chaque source à un convertisseur DC-DC. L'intérêt des convertisseurs est l'adaptation des paramètres électriques (tension/courant) entre la source et la charge. La dynamique de régulation imposée à chaque convertisseur permet d'ajuster le partage de puissance. Le convertisseur de la PàC est unidirectionnel et est un amplificateur de tension. Les autres convertisseurs sont dédiés au SC et à la batterie. Ces convertisseurs DC/DC sont bidirectionnels en courant (Buck/boost) en fonction du mode de fonctionnement (récupération/alimentation en énergie). Du point de vue du contrôle, cette structure est intéressante car elle permet un contrôle total de tous les composants en termes de distribution rapide de la puissance de la charge, de l'état de charge des sources de stockage et de la régulation de la tension fournie à la charge.

Dans cette section plusieurs modèles sont étudiés comme indiqué dans la section 3.4 avec plusieurs scénarios :

4.4.3.1 Deuxième structure PàC/batterie/SC : système d'ordre 6

Comme mentionnée dans le chapitre 3, la structure PàC/Batterie/SC étudiée est un système non-linéaire d'ordre 6 ; avec les variables du vecteur d'état définies comme suit :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [i_{FC}, V_{DC}, i_{SC}, V_{SC}, i_B, i_L]^T$$

4.4.3.1.1 Formulation du problème

Le but principal de la commande proposée dans cette étude réside dans l'asservissement de la tension du bus vers la tension désirée pour gérer le flux d'énergie entre la PàC, Batterie, SC et la charge, de telle sorte que la $P_L = P_{PàC} + P_B + P_{SC}$. Le contrôle proposé devra forcer la batterie à aider la PàC pour alimenter la charge lorsque cette dernière n'est pas capable de l'assurer. En plus, la batterie et/ou SC fournit et/ou absorbe les pics de puissances demandés par la charge. Ces objectifs sont atteints par l'intermédiaire du choix suivant des trajectoires d'équilibre :

$$x = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6]^T = \left[\bar{x}_1, V_d, \bar{x}_3, V_{SC}^d, \bar{x}_5, \frac{V_d - E_L}{R_L} \right]^T$$

Ici le courant de référence de la batterie est introduit sous forme d'un échelon.

Par la suite, les lois de contrôle à l'équilibre sont définies comme suit :

$$\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \bar{\mu}_3]^T = \left[\frac{V_{FC}}{V_d}, \frac{V_{SC}^d}{V_d}, \bar{\mu}_3 \right]^T$$

L'écriture du système d'équation d'état en utilisant la variable d'erreur \tilde{x} est comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_2 + \bar{x}_2 (\bar{\mu}_1 - \mu_1)] \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \frac{1}{C_{DC}} [\mu_1 \tilde{x}_1 + \mu_2 \tilde{x}_3 + \mu_3 \tilde{x}_5 - \tilde{x}_6 + \bar{x}_1 (\bar{\mu}_1 - \mu_1) + \bar{x}_3 (\bar{\mu}_2 - \mu_2) \\ &\quad + \bar{x}_5 (\bar{\mu}_3 - \mu_3)] \\ \dot{\tilde{x}}_3 &= \frac{1}{L_{SC}} [-\mu_2 \tilde{x}_2 + \tilde{x}_4 + \bar{x}_4 - \mu_2 \bar{x}_2] \\ \dot{\tilde{x}}_4 &= -\frac{1}{C_{SC}} [\tilde{x}_3 + \bar{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 &= \frac{1}{L_B} [-\mu_3 \tilde{x}_2 + \bar{x}_2 (\bar{\mu}_3 - \mu_3) - r_B \tilde{x}_5] \\ \dot{\tilde{x}}_6 &= \frac{1}{L_L} [\tilde{x}_2 - R_L \tilde{x}_6] \end{aligned} \tag{4.37}$$

L'équation de la dynamique d'erreur sous forme PCH est exprimée comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = [J - R] \nabla H_d + \xi \tag{4.38}$$

$$[J - R] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-\mu_1}{C_{DC}L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_1}{C_{DC}L_{FC}} & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{DC}L_L} \\ 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DC}L_{SC}} & 0 & \frac{1}{C_{DC}L_L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{C_{DC}L_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r_B}{L_B^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{DC}L_L} & 0 & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix}; \quad \nabla H_d = \begin{bmatrix} L_{FC}\tilde{x}_1 \\ C_{DC}\tilde{x}_2 \\ L_{SC}\tilde{x}_3 \\ C_{SC}\tilde{x}_4 \\ L_B\tilde{x}_5 \\ C_L\tilde{x}_6 \end{bmatrix}$$

$$\xi = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{FC}}(V_{FC} - \mu_1\bar{x}_2) \\ \frac{1}{C_{DC}}((\bar{\mu}_1 - \mu_1)\bar{x}_1 + (\bar{\mu}_2 - \mu_2)\bar{x}_3 + (\bar{\mu}_3 - \mu_3)\bar{x}_5) \\ \frac{1}{L_{SC}}(\bar{x}_4 - \mu_2\bar{x}_2) \\ \frac{1}{C_{SC}}(-\bar{x}_3) \\ \frac{1}{L_B}(\bar{x}_2(\bar{\mu}_3 - \mu_3)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les lois de contrôle choisies sont comme suit afin d'avoir une structure PCH en boucle fermée :

$$\begin{cases} \mu_1 = \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = \bar{\mu}_2 - r\tilde{x}_3 \\ \mu_3 = \bar{\mu}_3 \end{cases} \quad 4.39$$

Le choix de μ_1 permet le contrôle de la tension du bus DC malgré la variation de la tension de la PàC, le choix de μ_2 permet le contrôle du courant x_3 et la tension du SC à leur consigne et la tension nominale du SC, respectivement. Tandis que le choix du μ_3 permet le contrôle du courant de la batterie x_5 . L'équation en boucle fermée est donnée par la relation 4.40.

L'origine du système 4.41 en boucle fermée avec les lois de contrôle proposées avec la fonction d'énergie radialement non bornée est globalement stable.

Preuve : la dynamique d'erreur en boucle fermée est donnée par :

$$\dot{\tilde{x}} = [J(\mu) - R']\nabla H_d \quad 4.40$$

avec : $R' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; 0; \frac{r_B + r_d}{L_B^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = R'^T \geq 0$

La dérivée temporelle de la fonction d'énergie désirée le long de la trajectoire de (4.40) est :

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{x} = -\nabla H_d^T R' \nabla H_d \leq 0$$

4.4.3.2 Deuxième structure PàC/batterie/SC: en présence de défaut

Dans cette étude un système d'ordre 8 est étudié, d'où le vecteur d'espace d'état suivant :

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T = [V_s, i_{FC}, V_{DC}, i_{DC}, V_{SC}, i_{SC}, i_B, i_L]^T$$

4.4.3.2.1 Formulation du problème

L'objectif de cette étude est le contrôle de la tension du bus DC à travers les trois convertisseurs et réduire le stress sur la PàC. Les pics de puissance demandés par la charge devront être fournis par la batterie et/ou le SC. La batterie est chargée de fournir la puissance de démarrage permettant une réponse rapide en puissance le temps que la PàC prenne progressivement le relais. Le contrôle proposé devra forcer le système à satisfaire la demande en puissance même en présence d'un défaut. En effet, au moment du défaut, la batterie fournit la puissance manquante en complément de la PàC.

Ces objectifs peuvent être exprimés par l'assignation de trajectoires d'équilibre définies comme suit :

$$x = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4, \bar{x}_5, \bar{x}_6, \bar{x}_7, \bar{x}_8]^T = \left[V_d, \bar{x}_2, V_d, \bar{x}_4, \bar{x}_5, 0, \bar{x}_B, \frac{V_d}{R_L} \right]^T$$

Un objectif intrinsèque de la structure étudiée est d'utiliser les sources secondaires pour fournir l'énergie dans les phases transitoires et pour alimenter la charge au démarrage. Par conséquent, la tension d'équilibre du SC est une constante ($\bar{x}_5 = \bar{V}_{SC}$), elle correspond à la valeur nominale de la tension SC. Alors que $\bar{x}_2, \bar{x}_4, \bar{x}_7$ sont définis en fonction du scénario proposé et notamment du rôle attribué à la batterie. Par conséquent, les valeurs des commandes à l'équilibre sont :

$$\bar{\mu} = [\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2, \bar{\mu}_3] = \left[\frac{V_{FC}}{V_d}, \frac{\bar{V}_{SC}}{V_d}, \bar{\mu}_B \right] \quad 4.41$$

Dans cette étude, le courant de la batterie à l'équilibre est proposé par l'équation suivante en prenant en considération son état de charge ainsi que l'information sur le défaut.

$$\bar{x}_B = [B * e^{-at} + ((1 - \alpha) * I_{FC})] * SOC \quad 4.42$$

Avec B : constante définissant la valeur initiale (et donc maximale) du courant de démarrage de la batterie.
a : est une constante définissant le temps de démarrage souhaité pour la PàC.

L'équation de la trajectoire d'équilibre du courant de la batterie est choisie de manière à ce que la batterie fournisse l'énergie de démarrage du système tandis que la PàC démarre lentement et prenne progressivement le relais de la batterie. Ce temps de transition et de démarrage de la PàC est exprimé par une exponentielle $B * e^{-at}$. Cette expression peut être ajustée par l'utilisateur en modifiant B et a. Entre autres, cette expression impose une transition et un relais d'une manière continue et fluide. Ce choix clé de la référence du courant de la batterie permet de prendre en compte : (i) le défaut en intégrant le terme $(1 - \alpha) * I_{FC}$ indiquant le pourcentage du défaut sur le courant de la PàC, (ii) l'état de charge de la batterie en introduisant le paramètre SOC.

Pour le scénario du défaut au niveau de la PàC, la puissance de cette dernière est réduite (due au défaut et exprimée en termes de courant de référence) est introduite dans le courant de référence de la batterie. Selon l'énergie totale nécessaire, si le SOC est plein, la batterie est capable de compenser complètement les pertes de puissance de la PàC. Sinon, la batterie compense le maximum qu'elle peut faire en permettant au véhicule d'avoir une continuité de service en mode dégradé et d'atteindre la destination finale.

L'estimateur Coulomb-métrique est utilisé afin d'estimer l'état de charge de la batterie :

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{i_B}{Q_n} dt \quad 4.43$$

SOC_0 L'état de charge initial de la batterie, i_B courant de la batterie et Q_n capacité nominale de la batterie.

En remplaçant le courant de la batterie à l'équilibre, nous pouvons retrouver les paramètres $\bar{x}_2, \bar{x}_4, \bar{\mu}_3$, qui sont donnés par les équations suivantes :

$$\bar{\mu}_B = (e_B + aL_B - r_B) \frac{\bar{x}_B}{V_d} \quad 4.44$$

$$\bar{x}_4 = \frac{V_d}{R_L} - \bar{\mu}_B \bar{x}_B \quad 4.45$$

$$\bar{x}_2 = \frac{V_d}{V_{FC}} \bar{x}_4 \quad 4.46$$

4.4.3.2.2 Représentation PCH et loi de commande IDA-PBC

La fonction de l'énergie désirée en boucle fermée est donnée comme suit :

$$H_d = \frac{1}{2} \tilde{x}^T Q \tilde{x} \quad 4.47$$

Dans (4.49), nous utilisons un changement de variable \tilde{x} qui correspond à l'erreur entre la variable et sa référence. Donc les nouvelles équations d'état en termes de dynamique d'erreur sont :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= \frac{1}{C_S} [\mu_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_4 + \bar{x}_2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1)] \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \frac{1}{L_{FC}} [-\mu_1 \tilde{x}_1 - V_d (\mu_1 - \bar{\mu}_1)] \\ \dot{\tilde{x}}_3 &= \frac{1}{C_{DC}} [\tilde{x}_4 - \tilde{x}_8 + \mu_2 \tilde{x}_6 + \mu_3 \tilde{x}_7 + \bar{x}_7 (\mu_3 - \bar{\mu}_3)] \\ \dot{\tilde{x}}_4 &= \frac{1}{L_{DC}} [\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3] \\ \dot{\tilde{x}}_5 &= \frac{-1}{C_{SC}} [\tilde{x}_6] \\ \dot{\tilde{x}}_6 &= \frac{1}{L_{SC}} [\tilde{x}_5 - \mu_2 \tilde{x}_3 - V_d (\mu_2 - \bar{\mu}_2)] \\ \dot{\tilde{x}}_7 &= \frac{1}{L_B} [-r_B \tilde{x}_7 - \mu_3 \tilde{x}_3 - V_d (\mu_3 - \bar{\mu}_3)] \\ \dot{\tilde{x}}_8 &= \frac{1}{L_L} [-R_L \tilde{x}_8 + \tilde{x}_3] \end{aligned} \quad 4.48$$

$$y = \tilde{x}_3$$

Le système d'équation (4.48) est exprimé en utilisant le gradient de la fonction d'énergie comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = [J(\mu) - R]\nabla H_d + A_i(\bar{x}, \mu) \quad 4.49$$

Avec

$$[J-R] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\mu_1}{C_s L_{FC}} & 0 & \frac{-1}{C_s L_{DC}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu_1}{C_s L_{FC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{DC} L_{DC}} & 0 & \frac{\mu_2}{C_{DC} L_{SC}} & \frac{\mu_3}{C_{DC} L_B} & \frac{-1}{C_{DC} L_L} \\ \frac{1}{C_s L_{DC}} & 0 & \frac{-1}{C_{DC} L_{DC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{C_{DC} L_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_2}{C_{DC} L_{SC}} & 0 & \frac{1}{C_{DC} L_{SC}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-\mu_3}{C_{DC} L_B} & 0 & 0 & 0 & \frac{-r_B}{L_B^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{DC} L_L} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-R_L}{L_L^2} \end{bmatrix}; \nabla H_d = \begin{bmatrix} C_s \tilde{x}_1 \\ L_{FC} \tilde{x}_2 \\ C_{DC} \tilde{x}_3 \\ L_{DC} \tilde{x}_4 \\ C_{SC} \tilde{x}_5 \\ L_{SC} \tilde{x}_6 \\ L_B \tilde{x}_7 \\ L_B \tilde{x}_8 \end{bmatrix}; \zeta(\bar{x}, \mu, \bar{\mu}) = \begin{bmatrix} \frac{\bar{x}_2}{C_s} (\mu_1 - \bar{\mu}_1) \\ \frac{V_d}{L_{FC}} (\mu_1 - \bar{\mu}_1) \\ \frac{\bar{x}_7}{C_{DC}} (\mu_3 - \bar{\mu}_3) \\ 0 \\ 0 \\ \frac{-V_d}{L_{SC}} (\mu_2 - \bar{\mu}_2) \\ \frac{-V_d}{L_B} (\mu_3 - \bar{\mu}_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Afin d'obtenir la structure PCH stable en boucle fermée, les lois de contrôle sont proposées :

$$\begin{cases} \mu_1 = \bar{\mu}_1 \\ \mu_2 = \bar{\mu}_2 - r \tilde{x}_6 \\ \mu_3 = \bar{\mu}_3 \end{cases} \quad 4.50$$

Avec $r > 0$ est un paramètre de réglage à désigner.

L'origine du système PCH (4.51) en boucle fermée avec les lois de contrôle proposées (4.50), (4.41) et (4.44) et avec la fonction d'énergie radialement non bornée (4.48) est globalement stable.

Preuve de stabilité :

La dynamique du système PCH en boucle fermée (4.51) avec les lois de contrôle (4.50), (4.41) et (4.44) est :

$$\dot{\tilde{x}} = [J(\mu) - R']\nabla H_d \quad 4.51$$

$$AvR' = \text{diag} \left\{ 0; 0; 0; 0; 0; 0; \frac{r_B + rV_d}{L_B^2}; \frac{R_L}{L_L^2} \right\} = R'^T \geq 0ec$$

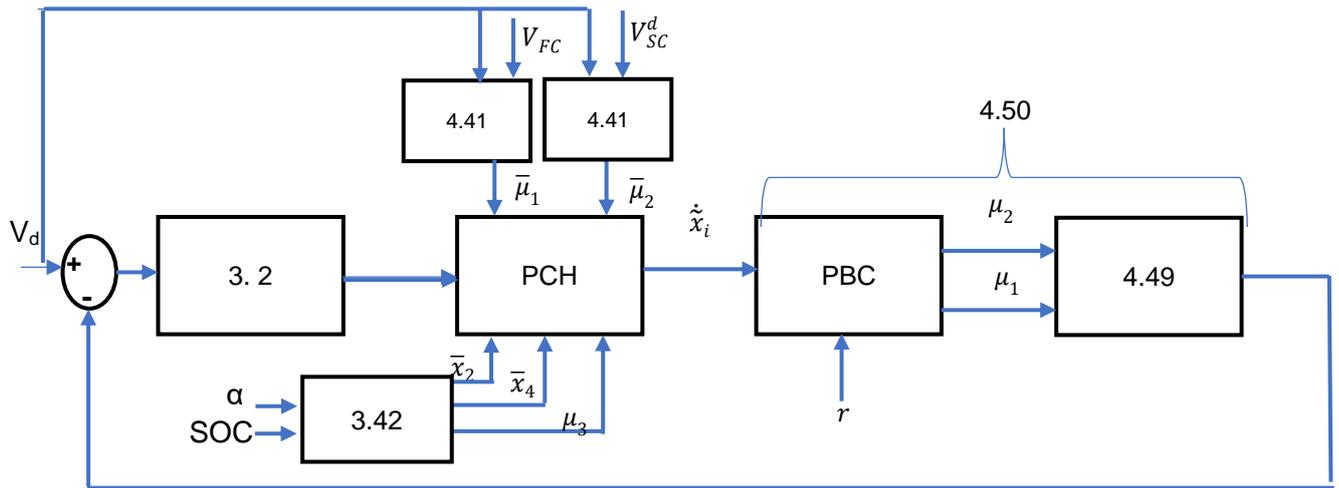
La dérivée temporelle de la fonction d'énergie (4.47) le long du trajet de (4.51) est :

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{\tilde{x}} = -\nabla H_d^T R' \nabla H_d \leq 0$$

Ainsi la stabilité est globale.

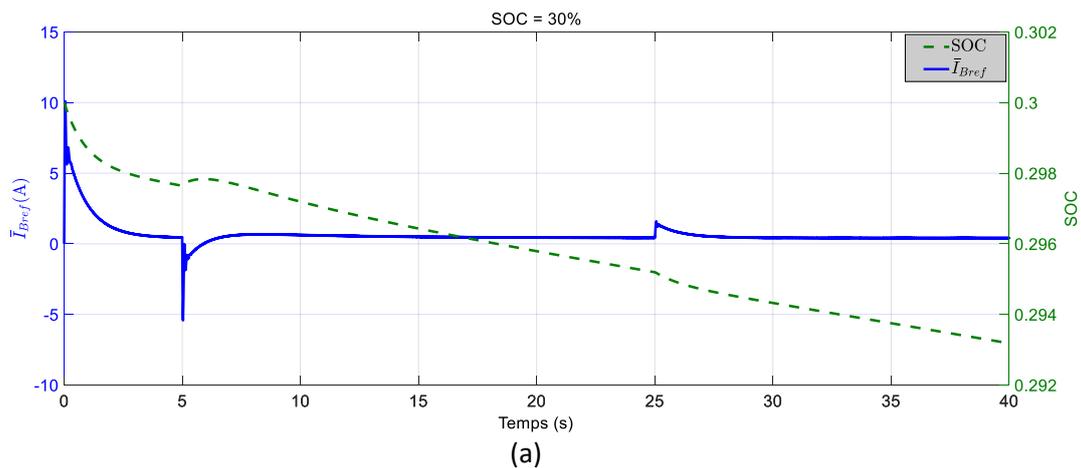
De plus, $\dot{H}_d = 0 \Leftrightarrow \dot{\tilde{x}} = 0$, selon le théorème de LaSalle, l'origine est globalement stable.

La stratégie de contrôle proposée peut être résumée dans le diagramme suivant :



4.4.3.3 Résultats de simulation

Afin de montrer l'effet de l'état de charge de la batterie sur la gestion d'énergie du système hybride étudié, différentes valeurs de l'état de charge de la batterie sont appliquées (30%,50%,70%). Les résultats du courant de batterie, sa référence, ainsi que son état de charge sont reportés sur les figures ci-dessous :



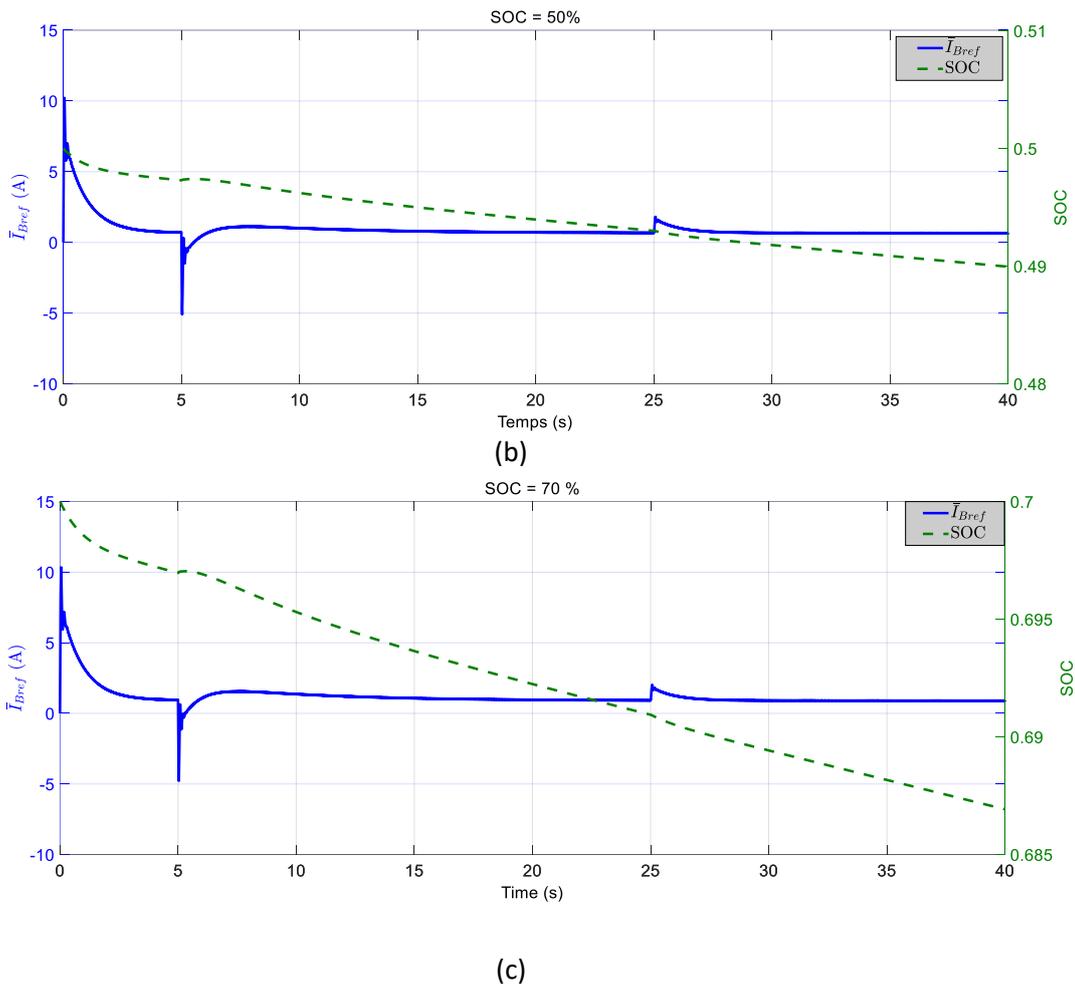
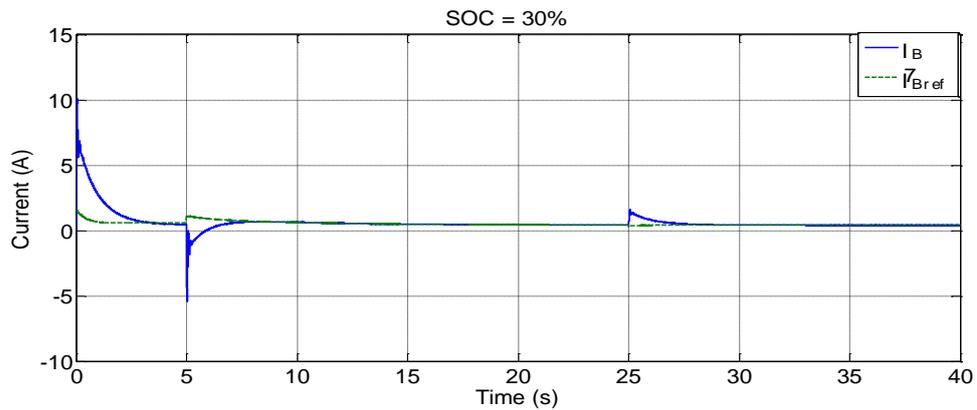


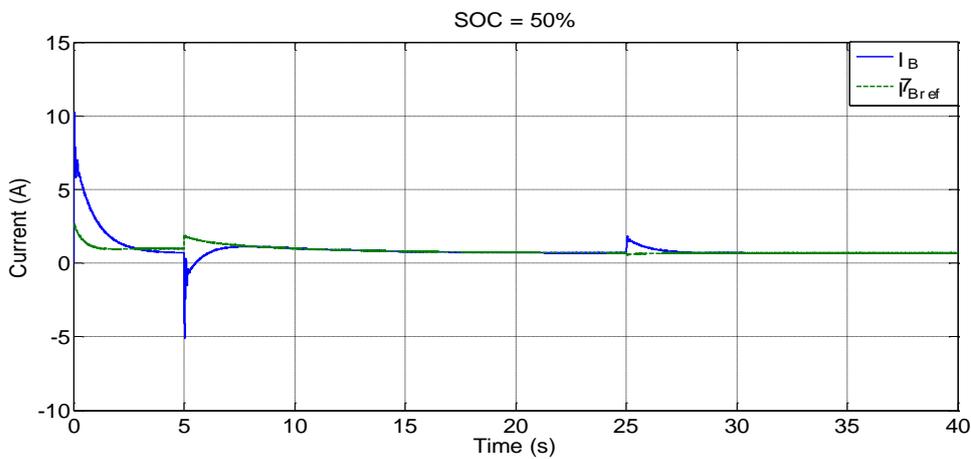
Fig.4.33 Résultats de simulation du courant de référence de la batterie et son SOC pour différents scénarios.

La Fig.4.33 reporte les courbes du courant de référence de la batterie et son état de charge. Ces courbes montrent l'effet de l'état de charge de la batterie sur la quantité de l'énergie que la batterie peut fournir à la charge afin d'aider la PàC pour satisfaire la demande en énergie de la charge. Il est à noter que les valeurs imposées pour l'état de charge de la batterie correspondent aux SOC initiaux.

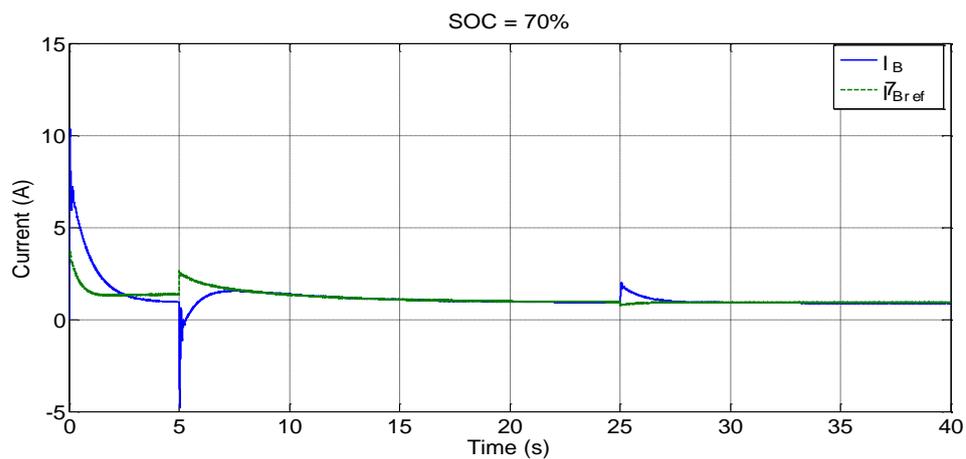
La Fig.4.33(a) représente l'effet du SOC = 30% sur le courant de référence de la batterie et donc du courant de la batterie, où le SOC diminue de 2.33%, ce qui montre la sollicitation de la batterie dans l'alimentation de la charge. La Fig.4.33 (b) montre qu'au démarrage le SOC de la batterie est de 50% et à la fin du cycle il est aux alentours de 49%, ce qui correspond à une diminution de 2%. Pour la Fig.4.33 (c), le pourcentage de diminution du SOC de la batterie est de 1.86%. De plus, à $t=5s$, là où on a imposé un défaut, le courant de la batterie diminue subitement et cela est observé dans toutes les courbes de la Fig.4.33. ce qui implique que la batterie répond rapidement à la demande de la PàC défaillée afin d'alimenter la charge. En récapitulant, à partir des courbes de la Fig.4.33, l'influence du SOC de la batterie sur son courant et par conséquent sa référence est clairement montrée. Plus le SOC est petit, plus le courant de la batterie est faible. Ceci est expliqué par le fait que la quantité de courant que la batterie peut fournir est limitée. Nous pouvons conclure aussi que la PàC est la source qui fournit le plus de puissance vu la quantité limitée du courant de batterie, ce qui est l'un des objectifs de cette étude (effet tampon).



(a)



(b)



(c)

Fig.4.34 Courant de la batterie et sa consigne pour différentes valeurs du SOC.

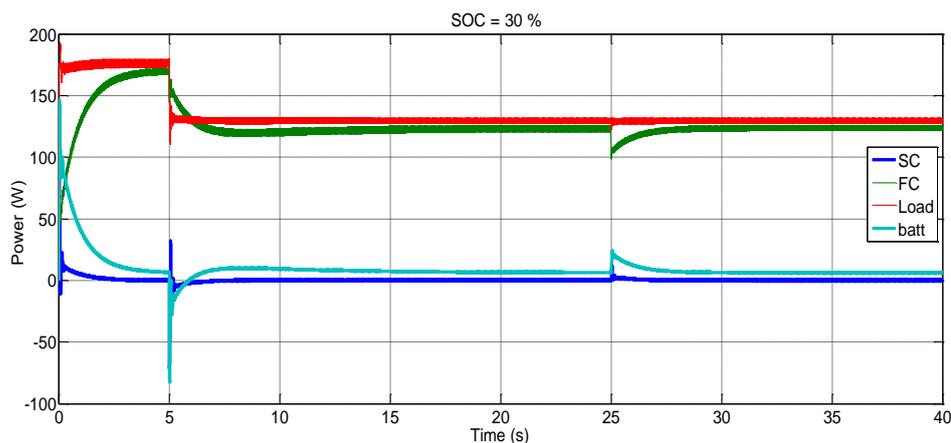
Les Fig.4.34 reportent le courant de la batterie et sa référence imposée en prenant en considération plusieurs scénarios selon la valeur de l'état de charge de la batterie initial. La Fig.4.34(a) montre le résultat

de simulation du premier scénario quand le SOC = 30%. Nous pouvons voir que le courant de la batterie suit exactement sa référence à l'équilibre. Cependant, des dépassements apparaissent au démarrage, dans les phases de transition et quand on applique le défaut. Quand le SOC = 30%, le courant de référence commence à 1.5A, alors que le courant de la batterie est à 0A, mais après 3 secondes, le courant de la batterie suit sa consigne. Une erreur apparaît à $t = 5s$ et à $t = 25s$, quand le défaut est appliqué. En effet, à l'équilibre le courant de la batterie et sa référence est aux alentours de 0.5A.

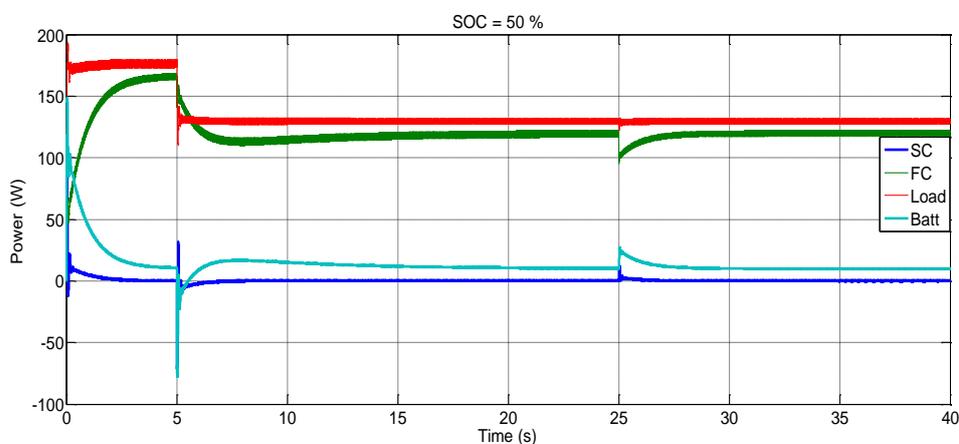
La Fig.4.34(b) représente la même courbe que la précédente avec un SOC = 50%. Dans ce scénario, le courant de la batterie suit parfaitement sa référence à l'équilibre. Cependant, des erreurs sont apparues dans les mêmes phases citées dans la figure précédente (Fig.4.34(a)). Les mêmes remarques sont observées avec des résultats précédents mais avec des valeurs du courant de la batterie et sa référence qui sont différentes. Le courant de la batterie est aux alentours de 0.8A.

Pour le troisième scénario (Fig.4.34(c)), on observe le courant de la batterie et sa consigne en considérant la valeur du SOC = 70%. Les mêmes remarques sont observées avec le courant de la batterie à l'équilibre qui est autour de 1.1A afin de compenser le défaut de la PàC.

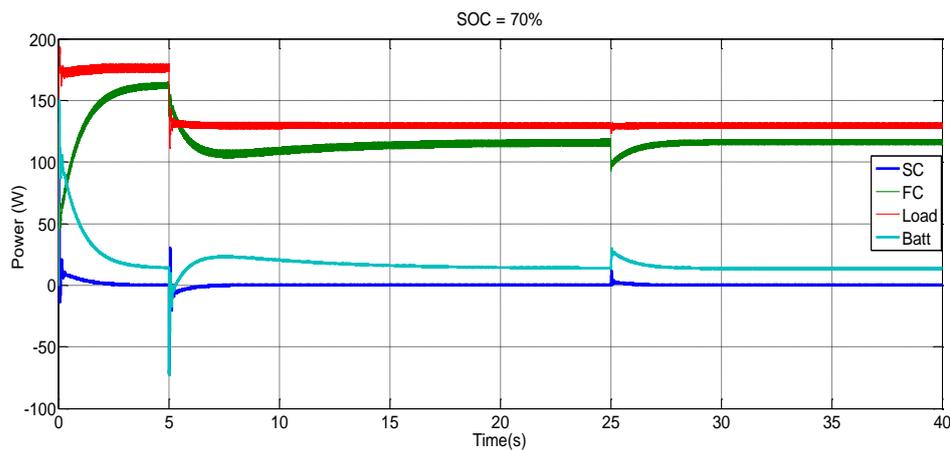
En résumant, nous pouvons dire que pour chaque pourcentage du SOC, le courant de la batterie suit parfaitement sa référence à l'équilibre. Cependant, durant les phases transitoires et lors du défaut, un léger dépassement est observé, ce qui est normal car le pourcentage d'erreur est acceptable.



(a)



(b)



(c)

Fig.4.35 Puissances des différentes sources de la structure PàC/Batterie/SC en considérant un défaut au niveau de la PàC à 25s et différentes valeurs du SOC initial de la batterie

Les courbes de la Fig.4.35 montrent les puissances des différentes sources utilisées dans le véhicule électrique hybride en appliquant un défaut au niveau de la PàC à $t = 25s$ et la commande tolérante au défaut prend en compte le SOC de la batterie. Ces courbes sont intéressantes car elles reflètent exactement le scénario proposé. L'influence de l'état de charge de la batterie sur la gestion de l'alimentation du système est clairement indiquée lorsque le défaut se produit. La batterie fournit l'énergie manquante due à la défaillance de la PàC en fonction de la quantité de l'énergie dont elle dispose et donc de son SOC.

A partir de la Fig.4.35, dans l'intervalle de temps $t = 0 - 5s$, il est clairement montré que la batterie fournit la majorité de la puissance demandée au démarrage en fonction de son état de charge aidée par le SC dans les transitoires. Après, la PàC prend progressivement le relais pour devenir la source principale en régime permanent permettant aux puissances de la batterie et du SC de diminuer jusqu'à atteindre zéro. A $t = 5s$ lors du défaut, la puissance de la charge diminue permettant d'utiliser l'excès de puissance produite pour recharger la batterie et le SC. Dans la période $t = 5 - 25s$, la batterie avec la PàC joue un rôle complémentaire pour satisfaire la demande en puissance de la charge. A l'instant $t = 25s$, un défaut se produit dans le système PàC, cette dernière n'est pas en mesure de fournir la totalité de la puissance et d'alimenter seule la charge. C'est la raison pour laquelle, la batterie délivre l'énergie manquante pour satisfaire la demande de la charge toute en prenant en considération son état de charge. Par exemple, le cas de la Fig.4.35(a), où $SOC = 30\%$, le courant de la batterie n'est que de 0.5A. Dans toutes les courbes de la Fig.4.35, l'influence de l'état de charge de la batterie est clairement montrée. Dans cette étude en simulation, la puissance de la PàC manquante est supposée de 20%.

Il est important de noter que les SC, en raison de leurs caractéristiques, sont incapables de fournir l'énergie pendant une longue période, mais ils produisent ou absorbent une puissance considérable pendant quelques secondes. Par conséquent, ils sont en mesure d'absorber ou de fournir des pointes de puissance de charge. Cependant, ils ne peuvent pas être utilisés dans le contrôle tolérant aux défauts qui nécessite une source d'énergie de remplacement et non pas une source de puissance.

Pour plus de détails, la puissance et l'énergie pour chaque source sont calculées pour un seul scénario correspondant à un SOC = 70% et sont reportées dans le tableau 4.6.

Dans ce scénario, l'énergie demandée de la charge est de 2.8341 kWh. Pour satisfaire cette demande, la PàC fournit la majorité de l'énergie qui est égale à 2.4589 kWh. En plus, la batterie alimente la charge selon son SOC avec une énergie de 369.6846 Wh. Tandis que le SC qui est utilisé seulement dans les phases de transition, fournit une énergie égale à 6.3420 Wh. Ces calculs vérifient clairement la relation $E_{charge} = E_{PàC} + E_{Batterie} + E_{SC}$.

Tableau.4.6. Energies et puissances des différentes sources utilisées

	Batterie	SC	PàC	charge
$P^+(W)$	1.3388×10^6	4.4717×10^4	8.8522×10^5	1.0203×10^7
$P^-(W)$	-7.9189×10^3	-2.1886×10^4	0	0
$E^+(Wh)$	371.8843	12.4214	2.4589×10^3	2.8341×10^3
$E^-(Wh)$	-2.1997	-6.00794	0	0
$\sum(P^+ + P^-)(W)$	1.3310×10^6	2.2831×10^4	8.8522×10^6	1.0203×10^7
$\sum(E^+ + E^-)(Wh)$	369.6846	6.3420	2.4589×10^3	
Énergie totale (Wh)	2.8349266×10^3			2.8341×10^3 Wh

4.4.3.4 Validation expérimentale

Afin d'expérimenter la technique de commande du système PàC/Batterie/SC représentée dans la Fig.4.36, un banc de test est conçu et montré sur la Fig.4.36. Il s'agit du même banc d'essai utilisé pour la structure PàC/SC, nous avons intégré en plus des batteries et un troisième convertisseur Buck/boost pour les batteries. Trois batteries au plomb-acide de 12 V chacune, connectées en série entre elles sont ajoutées. Ce pack de batterie est connecté au bus DC à travers un convertisseur DC-DC buck/Boost. La tension désirée du bus V_d est choisie en ligne sous le logiciel LabView égale à 42V. Le scénario de l'expérimentation consiste en le contrôle des trois convertisseurs afin d'asservir la tension du bus. La batterie peut être utilisée dans les phases de transitions avec le SC pour absorber ou fournir les pics de puissance. Aussi le pack de batteries peut être utilisé dans le régime permanent avec la PàC afin de satisfaire la demande en puissance de la charge lorsque la pile n'est pas capable d'alimenter seule la charge. Le même cycle de conduite utilisé pour la source hybride PàC/SC est appliqué pour cette étude.



Fig.4. 36 Banc de test pour l'hybridation PàC/Batterie/SC

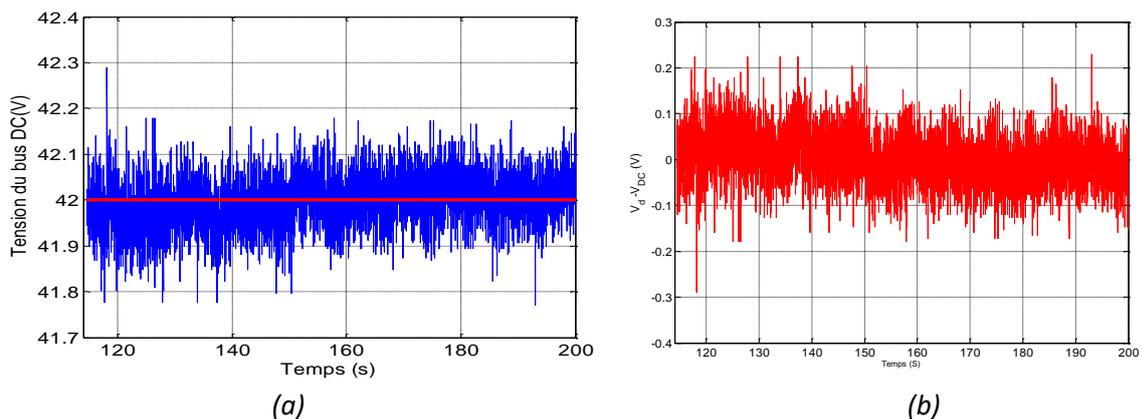
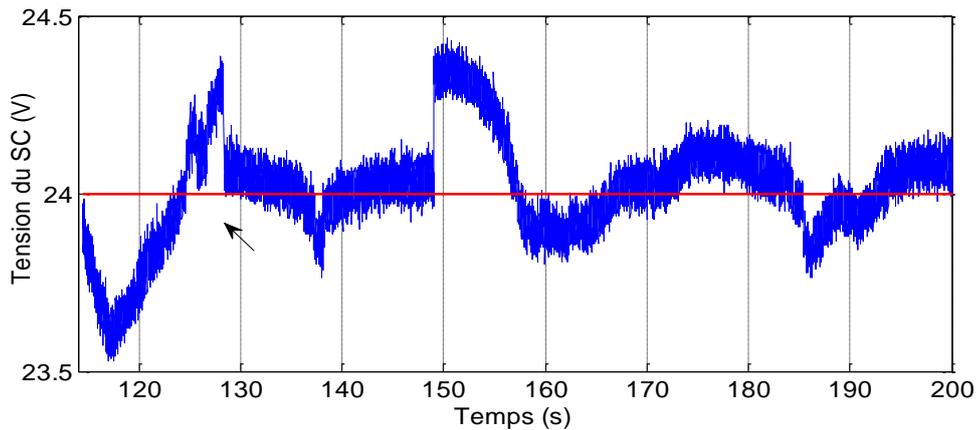
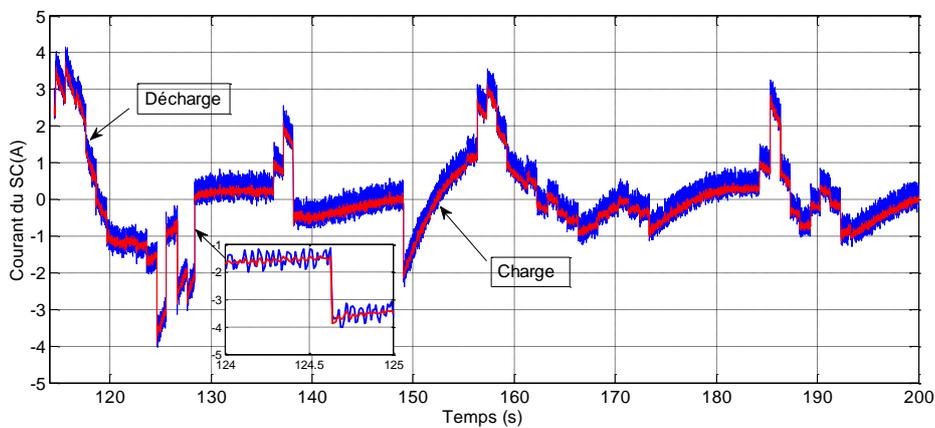


Fig.4.37 (a) Tension du Bus V_{DC} et sa référence, (b) Erreur d'asservissement de la tension V_{DC}

La réponse de la tension du bus ainsi que sa consigne sont représentées dans la Fig.4.37(a) qui montre que la tension du bus suit correctement la tension de référence avec une erreur quasi nulle de l'ordre de $\pm 0.2V$, comme montré dans la Fig.4.37(b).



(a)



(b)

Fig.4.38 Expérimentation : (a) tension du SC et sa consigne. (b) courant du SC et sa référence

La Fig.4.38 (a) et Fig.4.38 (b) représentent respectivement la tension et le courant du SC et leur référence. Nous pouvons remarquer à partir de la Fig.4.38(a) que la commande choisie force la tension du SC à suivre la référence qui correspond à sa tension nominale à 24V. L'erreur est de l'ordre $\pm 0.4V$, qui est une valeur acceptable. Le courant du SC et sa référence sont représentés sur la Fig.4.38 (b), nous remarquons que le courant du SC suit parfaitement sa consigne avec une erreur presque égale à zéro. Les valeurs positives du courant du SC correspondent à sa décharge, tandis que les valeurs négatives correspondent à sa charge. La courbe du courant du SC montre aussi que cette source est utilisée en particulier dans les phases de transition. En fonction des composants existants pour le banc de test, un faible courant négatif est appliqué représentant une phase de décharge. Il ne s'agit pas en pratique de recharger complètement les systèmes de stockage mais juste pour monter la faisabilité de cette option.

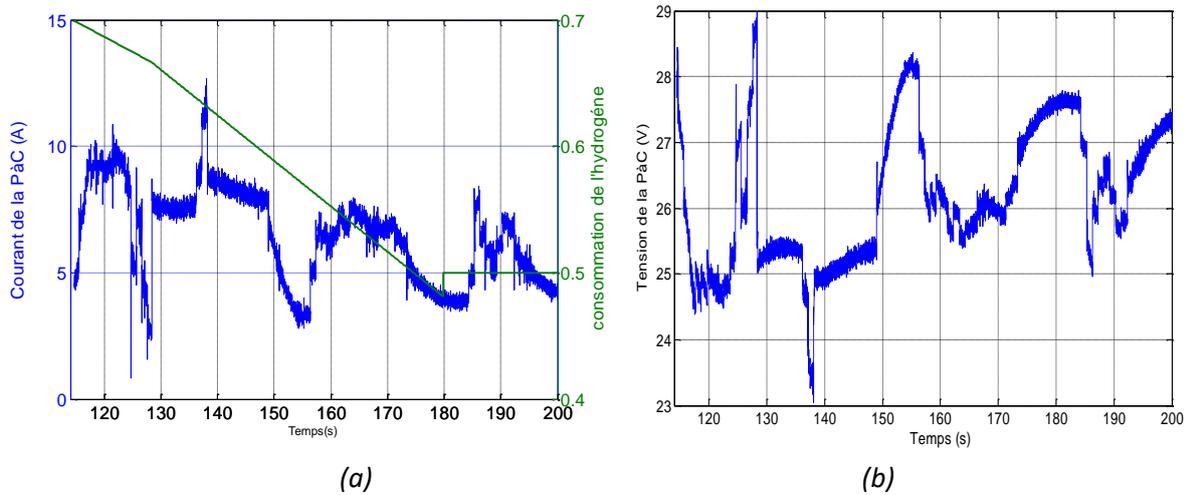


Fig.4.39. Réponse électrique de la PàC : (a) courant de la PàC et consommation de H_2 , (b) tension de la PàC

La Fig.4.39 reporte les résultats d'expérimentation du courant de la PàC et la consommation d'hydrogène dans le même graphe (voir Fig.4.39(a)) et la tension de la PàC dans la Fig.4.39 (b). Une évolution douce des variables de la PàC est observée, en effet que le SC et la batterie absorbent les pics de puissance et aident la PàC en régime permanent, respectivement. Le niveau d'hydrogène diminue progressivement tant que la PàC fournit de l'énergie.

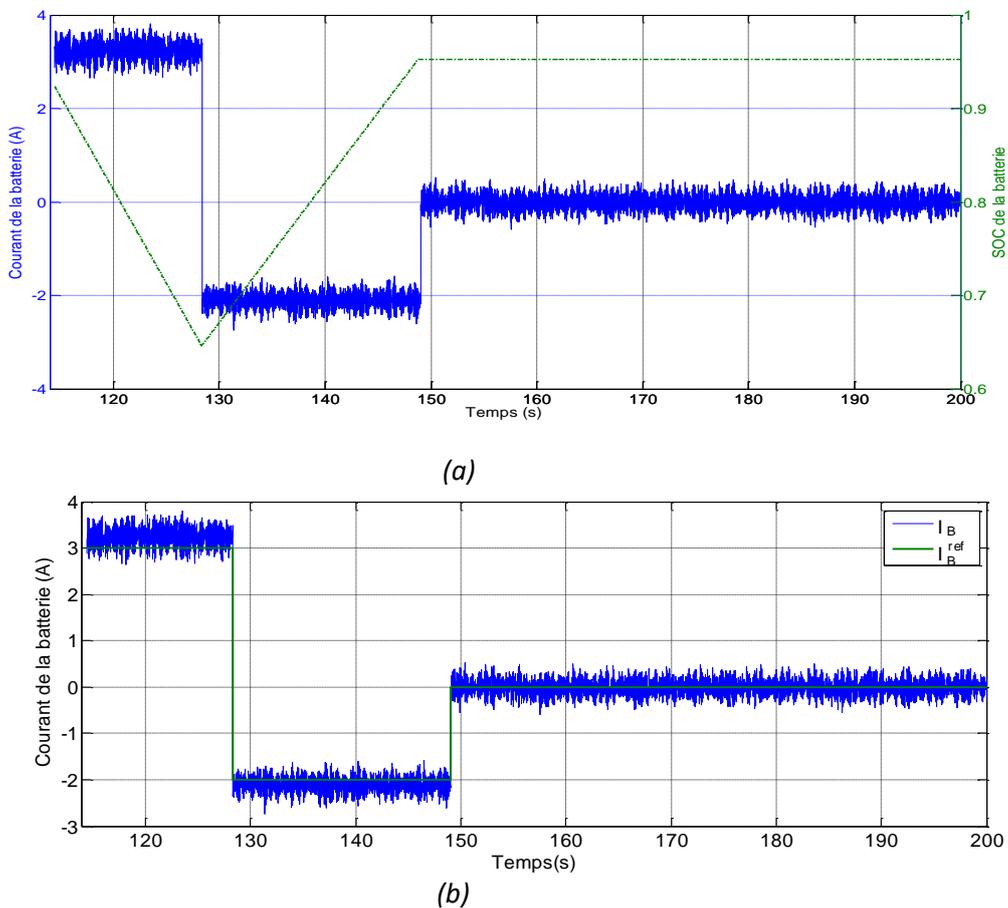


Fig.4.40 Expérimentation : (a) courant de la batterie et son SOC, (b) courant de la batterie et sa référence.

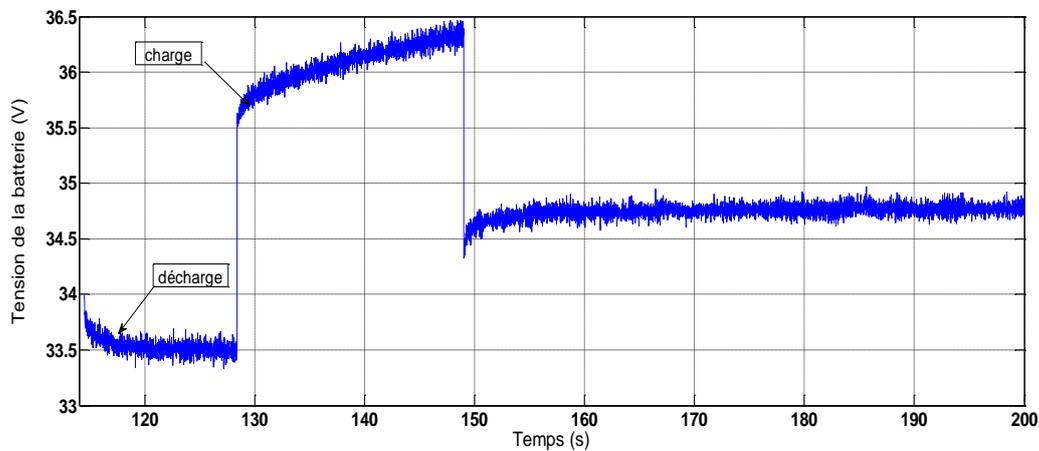


Fig.4.41 Expérimentation : tension de la batterie

Les courbes de la Fig.4.40 illustrent le courant de la batterie et son état de charge (a) et le courant de la batterie et sa référence (b)

Dans la Fig.4.40(a), nous remarquons qu'au début le courant de la batterie est de l'ordre de 3 A ce qui explique que la batterie fournit de l'énergie durant la période $t = 114s - 128s$ et ceci est traduit par la diminution du SOC de la batterie de 96% à 65%. Après, le courant de la batterie présente une valeur négative de -3A (durant la période $t = 128s - 149s$) ce qui explique qu'elle se charge par la PàC et ce qui est montré par l'augmentation de son SOC de 65% à 96%, c'est-à-dire sa valeur initiale. Après et jusqu'à la fin du cycle, le courant de la batterie est égal à 0A ce qui traduit la non sollicitation de la batterie durant cette période et le SOC reste à sa valeur initiale c'est à dire 96%.

La Fig.4.41 montre la tension de la batterie qui permet d'illustrer la phase de décharge et de recharge de la batterie ainsi que la phase où la batterie ne fournit rien à la charge. Notons que la tension de la batterie la plus basse est de 33.5V et la tension maximale est de l'ordre de 36.4 V. Tandis qu'une tension de 34.7V est affichée lorsqu'elle n'est pas sollicitée ($t = 149s - 200s$).

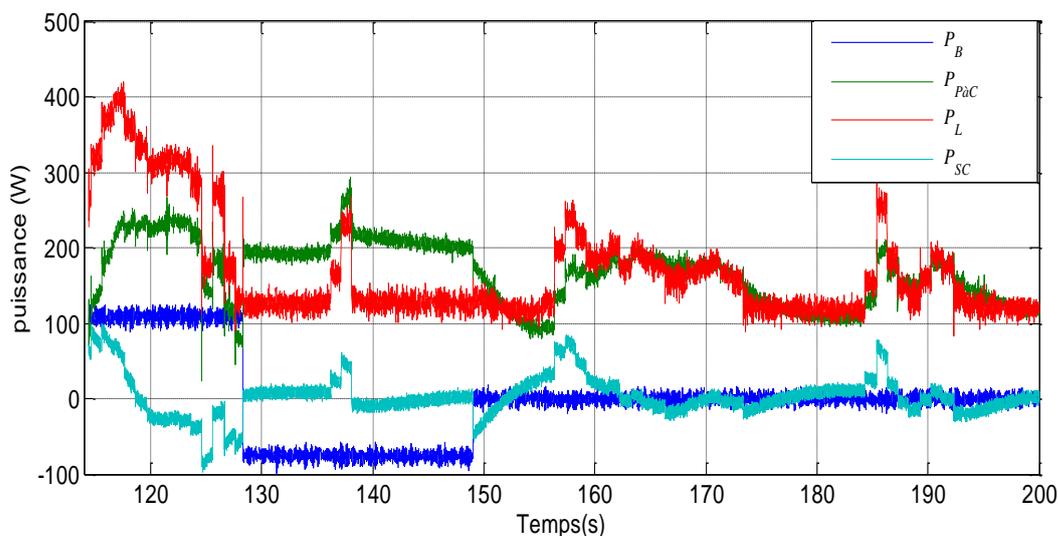


Fig.4.42 Puissances des différentes sources de la structure PàC/Batterie/SC obtenues en expérimentation

Les flux de puissances sont reportés dans la Fig.4.42. La première remarque à noter à partir de cette figure est que la puissance de la charge est la somme des puissances des sources. Cette figure indique que la PàC fournit la majorité de l'énergie pendant tout le cycle \Rightarrow premier objectif satisfait. En plus, quand la quantité d'énergie fournie par la PàC décroît c'est la batterie qui compense ce manque (PàC et la batterie jouent un rôle complémentaire) \Rightarrow deuxième objectif satisfait. Dans la période, $t = 128s - 149s$, la PàC charge la batterie et en même temps alimente la charge \Rightarrow troisième objectif satisfait. Le SC est sollicité juste dans les phases de transition \Rightarrow quatrième objectif satisfait. Cette figure reflète donc le scénario proposé.

4.5 Conclusion

Le contrôle fondé sur la passivité de l'interconnexion et de l'assignation d'amortissement (IDA-PBC) est une technique qui régule le comportement des systèmes non linéaires en assignant une structure souhaitée (Hamiltonienne contrôlée par le port) en boucle fermée, formulée pour les systèmes décrits par les modèles PCH. Dans ce chapitre, les représentations sous forme PCH et la détermination des fonctions d'énergie de différents systèmes sont apportées. La théorie de la commande et la gestion d'énergie IDA-PBC sont présentées pour différentes structures hybrides destinée pour les applications transport. Différentes combinaisons de systèmes hybrides sont étudiées à savoir, PàC/Batterie, PàC/SC, PàC/Batterie/SC pour les applications transport. La théorie de cette commande a été validée en simulation et par des bancs de tests conçus. L'un des avantages des commandes proposées par l'IDA-PBC est qu'elles utilisent un minimum de mesures. Ce qui leur confère les avantages de robustesse aux paramètres, de simplicité de mise en œuvre et de la possibilité de fonctionnement en temps réel.

Chapitre 5 :
Commande optimale HJB + IDA-PBC

5 Commande optimale HJB + IDA-PBC

5.1 Introduction

L'association de la PàC avec un sous-système d'énergie supplémentaire comme la batterie et/ou le SC améliore les performances du véhicule électrique [160], comme c'est montré dans les chapitres précédents. Dans un véhicule électrique hybride, le système de stockage à base de SC et/ou de batteries associés à des PàC est essentiellement conçu pour fournir la puissance supplémentaire lors des fortes accélérations et lorsque la PàC atteint sa puissance maximale [161]. Avec cette hybridation, il est non seulement possible de compenser la faible puissance spécifique de la PàC, mais aussi de compenser les constantes de temps élevées des auxiliaires de la PàC [25]. Par conséquent, la durée de vie de la PàC peut être augmentée et le système peut récupérer l'énergie de freinage [162], [163]. En effet, le SC peut assister la PàC et permettre d'atteindre des pics de puissances selon une stratégie de gestion de l'énergie dédiée [159], [160], [164]. La batterie peut être utilisée avec la PàC en régime permanent ou en transitoire [56], [69], [165], [166]. Par conséquent, les stratégies de gestion de l'énergie du système hybride intéressent de fait la plupart des scientifiques et les chercheurs du monde entier afin de définir, optimiser et contrôler les paramètres et la distribution de la puissance et de l'énergie.

Le contrôle du véhicule électrique doit prendre en compte les contraintes liées à l'association de ses composants [167]. Tout d'abord, les sous-systèmes qui le composent sont fortement couplés [26], [168]. Par exemple, la PàC et le SC ne sont pas en mesure de satisfaire chacun seuls les besoins en puissance et en énergie de la traction du système. Pour ce faire, une méthode de contrôle intelligente est nécessaire pour gérer le flux d'énergie entre les sources utilisées [26], [88], [168]–[170]. De plus, la majorité des systèmes physiques ont des comportements non linéaires tels que la saturation [12], [160]. Le concepteur de la commande a le choix de considérer la non linéarité ou la linéarité du système étudié sur une plage de fonctionnement particulière. Les interactions et les non linéarités affectent la stabilité de l'ensemble du système, ce qui peut générer des pertes d'énergie et potentiellement endommager le véhicule [12], [95], [140]. Un autre critère important est que le contrôle développé doit pouvoir être mis en œuvre en temps réel [115].

La conception d'une commande intelligente pour le système hybride permet aux sources utilisées de partager les tâches en assurant la demande d'énergie, où les dispositifs de stockage prennent en charge les transitoires de puissance qui permettent d'augmenter la durée de vie de la PàC. En fait, les systèmes de stockage peuvent supporter la PàC, atteindre des pics de puissance élevés et protéger la PàC d'une dynamique rapide. De plus, en raison du temps de démarrage long de la PàC et grâce à l'énergie spécifique élevée de la batterie, cette dernière peut alimenter la charge et les auxiliaires de la PàC.

Les SCs ont la puissance spécifique et le nombre de cycles les plus élevés. Ils seront donc utilisés en premier dans les transitoires et pour récupérer l'énergie de freinage. Par conséquent, la solution la plus performante est l'association des trois sources dans un même système hybride PàC/SC/batterie afin d'augmenter la durée de vie de la PàC et la disponibilité du véhicule électrique [56], [58], [103], [162]. Dans un tel système hybride, la répartition optimale du flux d'énergie entre les sources est un point clé. De plus, la commande choisie doit assurer la stabilité du système en tenant compte du comportement non linéaire du système physique, des limitations des sources et de la mise en œuvre en temps réel. La gestion énergétique des véhicules hybrides (FC/SC, FC/Batterie, FC/SC/Batterie) par la commande classique et la logique floue (LF) ont fait l'objet de plusieurs études et l'optimisation de la distribution électrique des véhicules électriques a pris une place importante pour les chercheurs scientifiques [57],

[108], [126], [171]. Plusieurs méthodes de contrôle ont été proposées dans la littérature dans le but d'optimiser le flux d'énergie dans les systèmes hybrides et vont être abordées dans la section suivante.

5.2 Etat de l'art sur le contrôle optimal

Les auteurs de [21] se sont concentrés sur la gestion optimale de l'énergie fondée sur un contrôleur à Logique Floue (LF) du système hybride PàC/batteries. L'objectif de cette étude est de minimiser le temps de démarrage/arrêt de la PàC afin d'augmenter sa durée de vie. Les auteurs de [90] ont proposé d'utiliser la LF pour gérer l'énergie entre la PàC, la batterie et la charge électrique pour les applications de véhicules aériens sans pilote. La nouveauté du contrôleur proposé dans [90] a consisté à utiliser la majorité de l'énergie de la batterie et à minimiser la consommation d'hydrogène dans le réservoir de la PàC. Les résultats expérimentaux obtenus dans [90] ont permis d'établir l'efficacité de la stratégie de type LF en ligne assurant une puissance instantanée élevée à tout moment et une consommation d'hydrogène faible, tout en maintenant le SOC de la batterie à un état normal. Dans [172], la conception de la gestion de l'énergie en ligne est mise en évidence pour le système hybride PàC en utilisant deux contrôleurs combinés, à savoir un modèle dynamique et les réseaux de neurones. Les contrôleurs utilisés dans [172] ont été testés sur huit cycles de conduite en utilisant la méthode d'optimisation par gradient pour minimiser la consommation d'hydrogène. Les résultats de simulation ont montré les performances de la régulation optimale proposée et cela pour les différents cycles de conduite avec une minimisation de la consommation d'énergie équivalente. Dans [173], les auteurs ont étudié le système PàC/SC/Batterie pour les locomotives. La stratégie de contrôle utilisée est fondée sur le contrôle de type LF et la Stratégie de Minimisation de la Consommation Equivalente (ECMS) [173]. La puissance de la PàC est déduite par l'ECMS, alors que la puissance restante est répartie entre la batterie et le SC en fonction du scénario choisi pour chaque source. La commande proposée est évaluée en simulation pour un cycle de conduite ferroviaire urbain typique et montre qu'une faible consommation d'hydrogène est obtenue et que la durée de vie des sources utilisées a augmenté [173]. Les travaux de [174] ont proposé un système de contrôle classique fondé sur un contrôleur Intégral Proportionnel (IP) pour un système hybride FC/SC. La PàC et le SC sont contrôlés selon une stratégie de filtrage ou d'optimisation. Les deux sources se partagent les flux de puissance en fonction du profil de traction et de l'état de charge du SC. Les auteurs ont également proposé l'introduction de la saturation en puissance. Cependant, les non linéarités apportées par ces saturations ne sont pas prises en compte par les correcteurs. Les travaux ont été validés en expérimentation sur une échelle réduite sur des cycles de conduite standards, mais leur stabilité n'a pas été prouvée. Le travail de [12] a permis un découplage fréquentiel des puissances en temps réel pour réduire le stress sur la PàC. Des performances similaires ont également été obtenues par une combinaison de contrôle de platitude, de correcteurs de Dérivé proportionnel (DP) et de la gestion de l'énergie basée sur la logique floue [92]. La principale contribution de ce dernier travail est la mise en œuvre et la validation en temps réel des contrôles fondés sur la platitude et de la LF pour la régulation de la tension du bus DC.

Dans ce travail de thèse, une nouvelle idée est proposée qui est fondée sur la combinaison de deux stratégies différentes qui sont l'IDA-PBC (présentée dans le chapitre 4) et le contrôle optimal fondé sur la technique d'Hamilton Jacobi Bellman (HJB), dans le but d'une gestion d'énergie optimale d'un système hybride. La technique HJB permet de trouver la référence énergétique optimale à partager entre les sources en temps réel, en tenant compte des limitations des sources. Tandis que, la méthode IDA-PBC assure le contrôle et le suivi de l'énergie pour chaque source à leur référence tout en garantissant la

stabilité de la fonction d'énergie globale (fonction de Lyapunov) où le minimum réside à l'équilibre souhaité.

5.3 Principe de la méthode HJB

Dans le but de garantir le fonctionnement et l'autonomie du véhicule électrique hybride, il est nécessaire d'optimiser le fonctionnement des sources embarquées dans le système hybride [168], [175]. La commande optimale est l'une des méthodes qui traite le problème de l'optimisation dans le domaine du véhicule électrique. Dans ce travail de thèse, l'optimisation des contraintes des sources utilisées est prise en considération et est résolue par la résolution des équations d'HJB. Pour ce faire, les contraintes doivent être formulées sous forme d'un critère d'optimalité à résoudre. Par conséquent, le problème général de la détermination d'une commande optimale d'un processus peut être résumé comme suit :

- Vérifier les conditions initiales et finales ;
- Répondre à plusieurs contraintes imposées ;
- Optimiser un critère sélectionné.

Avant d'entamer la commande optimale, tout d'abord, nous allons voir quelques rappels mathématiques qui vont nous aider dans la méthodologie de la synthèse de la commande optimale.

5.3.1 Formulation du problème

Le système étudié doit être caractérisé par trois types de variables, qui sont :

- *Les variables de sortie*, sont généralement regroupées dans le vecteur appelé "y" de dimension m ;
- *Les variables de commande*, déterminées par le vecteur "u" de dimension l, son choix est essentiel car il permet d'agir sur l'évolution du processus.
- *Les variables d'état*, sont des variables internes qui caractérisent l'état du processus à un instant déterminé, et sont regroupées dans le vecteur "x" de dimension n.

Ces trois variables peuvent former un modèle de l'évolution d'un processus par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) \\ y = h(x, u, t) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$x \in \mathbb{R}^n, y \in \mathbb{R}^m, u \in \mathbb{R}^l, t \in \tau \subset \mathbb{R}$$

Dans le cas d'un système linéaire, l'équation d'état (IV.1) peut être exprimée comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(t)x + B(t)u \\ y = C(t)x + D(t)u \end{cases} \quad (5.2)$$

Avec : $A(t) : \tau \in \mathbb{R}^{n \times n}$; $B(t) : \tau \in \mathbb{R}^{n \times l}$; $C(t) : \tau \in \mathbb{R}^{m \times n}$; $D(t) : \tau \in \mathbb{R}^{m \times l}$

Les conditions initiales qui peuvent être fixées ou non, permettent de déterminer l'état initial et l'état final, après l'application de la commande. Elles sont exprimées par :

$$x(t_0) = x_0, x(t_f) = x_f \quad (5.3)$$

Les contraintes, peuvent être de natures instantanées ou intégrales. Les contraintes instantanées sont dédiées en général aux limitations physiques sur la commande ou sur l'état du processus, elles sont exprimées par une inégalité de la forme :

$$q(x, u, t) \leq 0, \quad q \in \mathbb{R}^q \quad (5.4)$$

Cependant, (IV.4) peut être transformée en égalité en ajoutant des variables

$$V^2 = [V_1^2, V_2^2, \dots, V_{n_q}^2]^T \text{ et qui donne l'égalité suivante :}$$

$$q(x, u, t) + V^2 = 0 \quad (5.5)$$

Pour le second type de contraintes dites intégrales, elles concernent généralement une limitation des ressources ou une limitation des résultats des actions, elles sont données par l'expression suivante :

$$\int_{t_0}^{t_f} p(x, u, t) dt \leq 0, p \in \mathbb{R}^{n_p} \quad (5.6)$$

Cette inégalité peut être remplacée par une égalité en ajoutant le terme $W^2 = [W_1^2, W_2^2, \dots, W_{n_p}^2]^T$, ce qui donne l'expression suivante :

$$\int_{t_0}^{t_f} (p(x, u, t) + W^2) dt = 0 \quad (5.7)$$

- Optimiser un critère sélectionné :

Le critère d'optimalité peut prendre en considération :

- Valeurs initiale et finale des états,
- Minimisation de l'écart final par rapport à une consigne donnée,
- Ensemble des valeurs de l'état ou de la commande à chaque instant.

Le critère d'optimalité est exprimé généralement par la formule suivante :

$$J = \underbrace{g(x_0, t_0, x_f, t_f)}_{\text{partie terminale}} + \int_{t_0}^{t_f} \Gamma(x, u, t) dt \quad (5.8)$$

Les principaux critères utilisés sont :

- ☞ *Les critères temps minimum* : utilisés dans les problèmes de sécurité et dans la minimisation des coûts liés à la durée, ils peuvent être exprimés par la relation suivante :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} dt \quad (5.9)$$

- ☞ *Les critères quadratiques* : interviennent dans les problèmes de minimisation de l'énergie, mise en œuvre d'asservissement (stabilisation/suivi de trajectoire), ainsi que dans des processus mettant en œuvre des énergies importantes. Ce type de critère correspond à l'intégrale d'une puissance et est exprimé par :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} u^2 dt \quad (5.10)$$

- ☞ *Les critères de type consommation* : concernent surtout les processus de production continue, dont on veut diminuer les coûts de fonctionnement, et les processus autonomes à ressources limitées dont on désire accroître la durée de fonctionnement. Ceci correspond à l'intégrale d'un débit :

$$J = \int_{t_0}^{t_f} |u| dt \quad (5.11)$$

Il est nécessaire de noter que le choix du critère est une étape importante dans la synthèse de la commande optimale.

Prenant le cas général de la minimisation de $\Gamma(x, u, t)/u$ en considérant le problème de contraintes dynamiques avec $f(x, u, t)$, avec $\dot{x} = f(x, u, t)$

- Approche d'Hamilton :

Dans cette approche, un terme appelé Hamiltonien du système est utilisé dans le but de simplifier la résolution :

$$H(x, u, \lambda, t) \triangleq -\Gamma(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, t) \quad (5.12)$$

Avec : Γ est un scalaire utilisé dans le critère à minimiser

λ appelé vecteur adjoint, est une variable permettant de simplifier le calcul.

f est la fonction caractérisant les équations des variables d'état du système.

$$\min H \Rightarrow dH = H_x dx + H_u du + H_\lambda d\lambda = 0 \quad (5.13)$$

Les équations canoniques d'Hamilton sont données par :

$$H_u = \Gamma_u + \lambda^T f_u = 0 \quad (5.14)$$

$$H_x = \Gamma_x + \lambda^T f_x = -\dot{\lambda} \quad (5.15)$$

$$H_\lambda = f(x, u, t) = \dot{x} \quad (5.16)$$

Où, H_u , H_x et H_λ sont les dérivées partielles de H selon u, x et λ , respectivement.

La commande optimale notée u^* est celle qui maximise l'Hamiltonien, les contraintes et les conditions terminales étant satisfaites.

L'une des méthodes pour résoudre les problèmes du contrôle optimal et la détermination de la commande optimale est l'introduction de l'équation d'Hamilton-Jacobi Bellman.

En considérant le problème sans contrainte, notons :

$$J(x^*(t), t) = \int_t^{t_f} \Gamma(x^*(\tau), u^*(\tau), \tau) d\tau \quad (5.17)$$

$$J(x^*(t), t) = \int_t^{t+\Delta t} \Gamma(x^*(\tau), u^*(\tau), \tau) d\tau + \int_{t+\Delta t}^{t_f} \Gamma(x^*(\tau), u^*(\tau), \tau) d\tau$$

$$J(x^*(t), t) = \Gamma(x^*(t), u^*(t), t)\Delta t + J(x^*(t + \Delta t), t + \Delta t)$$

$$J(x^*(t), t) = \Gamma(x^*(t), u^*(t), t)\Delta t + J(x^*(t), t) + \frac{\partial J(x^*(t), t)}{\partial t} \Delta t + \left[\frac{\partial J(x^*(t), t)}{\partial x} \right]^T f(x^*(t), u^*(t), t) + \xi(\Delta t)$$

Avec $\xi(\Delta t)$ est un terme d'ordre supérieur (négligeable).

$J(x^*(t + \Delta t), t + \Delta t)$ a été transformée en série de développement de Taylor.

La minimisation s'effectue à présent sur l'intervalle $\tau \in [t, t + \Delta t]$. Donc, on obtient l'équation de Hamilton-Jacobi suivante :

$$-\frac{\partial J(x^*(t), t)}{\partial t} = \Gamma(x^*(t), u^*(t), t)\Delta t + \left[\frac{\partial J(x^*(t), t)}{\partial x} \right]^T f(x^*(t), u^*(t), t) \quad (5.18)$$

$$\text{Soit } \lambda(t) = \frac{\partial J(x^*(t), t)}{\partial x}$$

L'équation V.18 devient :

$$-\frac{\partial J(x^*(t), t)}{\partial t} = \Gamma(x^*(t), u^*(t), t)\Delta t + \lambda(t)^T f(x^*(t), u^*(t), t)$$

$$-J_t^* = H(x^*(t), u^*(t), J^*, t) \quad (5.19)$$

Pour plus de détails sur la commande optimale, le lecteur peut se référer aux travaux de [176].

5.3.2 Intérêts de la combinaison HJB + IDA-PBC

Afin de résoudre le problème d'optimisation des ressources, une nouvelle contribution est proposée dans ce chapitre de thèse qui consiste à combiner le contrôle non linéaire basé sur la passivité avec la méthode HJB qui permet de trouver la meilleure répartition de la puissance entre les sources en temps réel, d'assurer la stabilité du système hybride en considérant la limitation des sources. L'hypothèse IDA-PBC consiste à considérer la fonction de stockage d'énergie dont le minimum est à l'équilibre souhaité. Cette combinaison traite également des contraintes de limitation des sources en utilisant la technique HJB. Cette dernière permet la supervision des ressources en hydrogène et au niveau du SOC et fournit les consignes de courants des sources secondaires aux boucles de régulation. D'autre part, l'approche IDA-PBC permet de modifier la matrice d'amortissement des systèmes Hamiltoniens du système hybride étudié, afin de forcer les courants des sources secondaires à suivre les références optimales déduites par la méthode HJB.

En d'autres termes, l'intérêt de la combinaison HJB+IDA-PBC est de trouver une stratégie de contrôle pour un système donné de manière à satisfaire un critère d'optimalité faisant appel à une fonction coût dépendante des variables d'état et du contrôle. Pour ce faire, des fonctions coûts de l'utilisation de l'hydrogène et des sources de stockage sont déterminées. Il est important de noter que le coût d'utilisation de l'hydrogène est différent de celui de l'utilisation de la batterie ou du SC qui peuvent être rechargé directement. De plus, l'utilisation d'une source ou d'une autre est introduite afin de pouvoir terminer un parcours en minimisant les consommations.

5.4 HJB + IDA-PBC pour le système PàC/Batterie

Dans cette section, le contrôle optimal est proposé en utilisant la méthode de HJB. Il s'agit de trouver de manière optimale les courants de la batterie et de la PàC en prenant en considération l'état de charge de la batterie et la quantité d'hydrogène dans le réservoir selon la demande de la charge. Les problèmes du contrôle optimal dans les véhicules électriques à base de PàC/Batterie résident principalement sur les questions suivantes : comment minimiser la consommation d'hydrogène ? Comment minimiser le stress sur les batteries en fonction de leur état de charge ? La réponse à ces questions vise à garantir le bon fonctionnement et l'autonomie de la voiture électrique hybride. Pour cela, il est nécessaire d'optimiser le fonctionnement des sources embarquées. Le contrôle optimal est l'une des méthodes qui résout le problème d'optimisation dans le domaine de véhicule électrique.

5.4.1 Méthode HJB + IDA-PBC

La structure du système PàC/batterie étudiée dans cette section est représentée dans la Fig.3.1. Le rôle des deux sources est de maintenir la tension du bus DC à sa valeur de référence. Il est important de signaler que le modèle pour la source hybride PàC/batterie est celui étudié dans la sous-section 3.1.2 (voir le système d'équations 3.7).

Pour le système PàC/batterie, le problème d'optimisation est défini par :

$$\min H_2 \Leftrightarrow \min P_{FC} \Leftrightarrow \min P_{FC}^2 \quad (5.20)$$

Afin d'établir la solution optimale pour la gestion de puissance dans le système hybride étudié, la fonction coût est introduite comme suit :

$$C = \alpha_1 P_{FC}^2 + \beta_1 P_B^2 \quad (5.21)$$

α_1 et β_2^6 sont des paramètres positifs de pondération à choisir afin de donner plus d'importance ou d'utilisation à une source parmi d'autres.

Avec :

$$\begin{aligned} \alpha_1 \times SOC &= \alpha_{SOC1} \\ \beta_1 \times Q_{H_2} &= \beta_{H_2} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Dans l'expérimental, α_1 et β_1 sont implémentés à l'aide d'une glissière où on peut les modifier en ligne. Dans la suite, les notations α_{SOC1} et β_{H_2} sont utilisés. Q_{H_2} est la quantité d' H_2 .

La fonction coût s'écrit comme suit : $J = \int_0^t C dt$

Pour cela, les contraintes doivent être formulées sous un critère d'optimalité qui doit être résolu, et qui est de la forme suivante :

$$f = P_{FC} + P_B - P_L = 0 \quad (5.23)$$

L'approche Hamiltonien est utilisée pour simplifier les calculs, et est donnée par :

$$H \triangleq C + \lambda_1^T f = \alpha_{SOC1} P_{FC}^2 + \beta_{H_2} P_B^2 + \lambda_1^T (P_{FC} + P_B - P_L) \quad (5.24)$$

Avec λ_1^T un multiplicateur Lagrangien. Les conditions nécessaires pour obtenir la solution optimale sont données par :

$$\begin{cases} H_{P_{FC}} = \frac{dH_{P_{FC}}}{dP_{FC}} = 2\alpha_{SOC1} P_{FC} + \lambda_1 = 0 \\ H_{P_B} = \frac{dH_B}{dP_B} = 2\beta_{H_2} P_B + \lambda_1 = 0 \\ H_\lambda = P_{FC} + P_B - P_L = 0 \end{cases} \quad (5.25)$$

Pour atteindre le résultat optimal, les conditions nécessaires (IV.25) doivent être satisfaites à tout moment, ce qui donne la répartition optimale des puissances entre les deux sources :

$$\begin{cases} P_{FC}^* = \frac{-\lambda_1}{2\alpha_{SOC}} \\ P_B^* = \frac{-\lambda_1}{2\beta_{H_2}} \end{cases} \quad (5.25)$$

P_{FC}^* , P_B^* sont les puissances optimales de la PàC et la batterie, respectivement, minimisant la fonction coût (IV.21). Ces puissances sont utilisées comme références. λ_1 est calculé en instantané en fonction de la puissance demandée par la charge et des limitations sur les sources en termes de niveau H_2 et SOC de la batterie.

⁶ Il est important de noter que le choix de α_1 et β_1 sont obtenu, selon le niveau de l'hydrogène dans le réservoir de la PàC et la valeur du SoC de la batterie, respectivement. Ce qui donne α_{SOC1} et β_{H_2} .

$$H\lambda = \frac{-\lambda_1}{2\alpha_{SOC}} - \frac{\lambda_1}{2\beta_{H_2}} = P_L \Leftrightarrow \lambda_1 = \frac{-2\alpha_{SOC}\beta_{H_2}}{\alpha_{SOC} + \beta_{H_2}} P_L \quad (5.26)$$

$$P_{FC}^* = \frac{\beta_{H_2}}{\alpha_{SOC} + \beta_{H_2}} P_L \quad ; \quad P_B^* = \frac{\alpha_{SOC}}{\alpha_{SOC} + \beta_{H_2}} P_L$$

A partir des équations de (IV.9), on peut remarquer que les puissances optimales de la PàC et de la batterie sont calculées instantanément en fonction de la puissance de la charge.

De plus, $P_{FC}^* + P_B^* = P_L$, On remplace les puissances optimales de la PàC et de la batterie dans (5.21), on retrouve la fonction de minimisation de coûts suivante :

$$C^* = \frac{\alpha_{SOC}\beta_{H_2}}{(\alpha_{SOC} + \beta_{H_2})} P_L^2 = \alpha_{SOC}\beta_{H_2} P_L^2 \quad (5.27)$$

$$P_{FC} = V_{FC} I_{FC}$$

$$P_B = V_B I_B = (e_B - r_B I_B) I_B = e_B I_B - r_B I_B^2$$

$$\Leftrightarrow e_B = \frac{P_B + r_B I_B^2}{I_B}$$

Les courants de référence de la PàC et de la batterie sont calculés comme suit :

$$P_B^* = V_B I_B^* \Leftrightarrow I_B^* = \frac{P_B^*}{V_B} \quad (5.28)$$

$$P_{FC}^* = V_{FC} I_{FC}^* \Leftrightarrow I_{FC}^* = \frac{P_{FC}^*}{V_{FC}}$$

V_{FC}, V_B sont des variables mesurées.

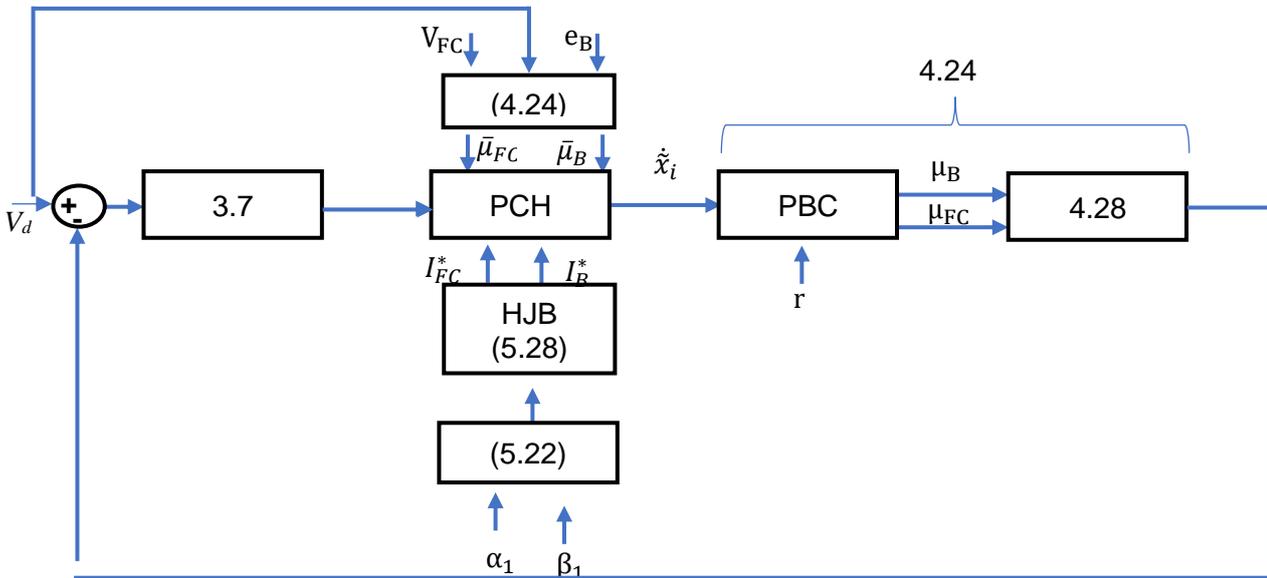


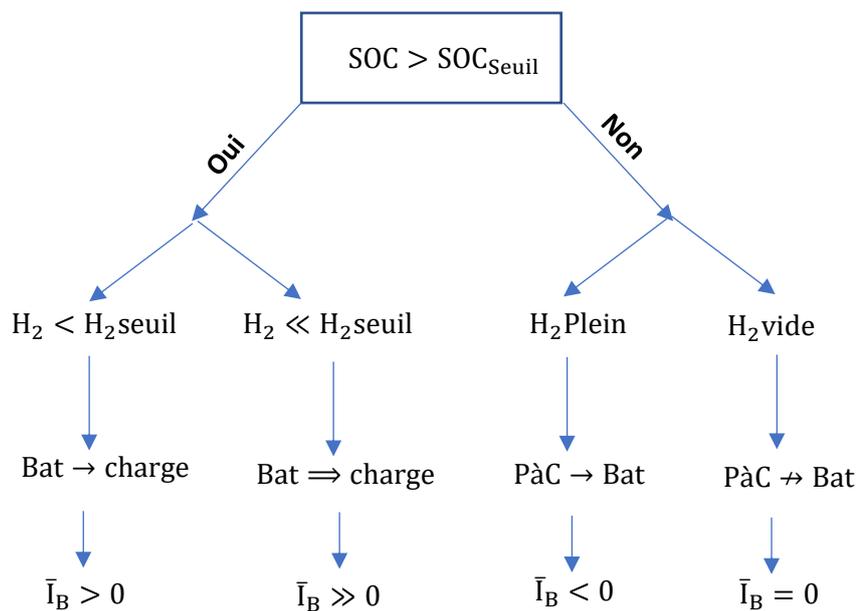
Fig.5.1 Principe du contrôle IDA-PBC+HJB pour le système PàC/Batterie

D'après la Fig.5.1, la première étape de la stratégie utilisée est la modélisation sous forme d'équations d'état (3.7). Afin de représenter la dynamique du système physique et de mettre en évidence la relation entre les différentes caractéristiques du système telles que l'amortissement et l'interconnexion, la

technique PCH est choisie pour la modélisation (tel que vu précédemment dans la section (4.2.1.2.)). Selon le scénario choisi et les contraintes des sources considérées, les trajectoires d'équilibre sont proposées et d'autres sont imposées. Les courants de référence de la batterie et de la PàC sont obtenus par la méthode de HJB en prenant en compte l'état de charge de la batterie ainsi que la minimisation de la consommation d'hydrogène (5.11). Par la suite, l'équation PCH du système en boucle fermée est réécrite avec la nouvelle variable d'erreur \tilde{x} . Par conséquent, les lois de contrôle sont définies et la preuve de stabilité est donnée.

5.4.2 Validation de la commande HJB + IDA-PBC

La gestion de la limitation des ressources par la méthode HJB consiste à générer le courant de référence des sources, notamment le courant de la batterie, où cette dernière a pour mission entre autres de fournir les pics de puissance ainsi que la participation à l'alimentation de la charge avec la PàC, selon le schéma suivant :



Le rôle de la batterie est fonction de son SOC, ainsi, lorsqu'il est supérieur à un SOC de seuil, on a deux possibilités selon H_2 :

- $H_2 < H_2\text{seuil}$: la batterie amorce sa participation pour l'alimentation de la charge → une petite valeur du courant de la batterie $\bar{I}_B > 0$.
- $H_2 \ll H_2\text{seuil}$: si le niveau d' H_2 est beaucoup plus faible que sa valeur de seuil → une grande participation de la batterie est attendue pour fournir de l'énergie à la charge, ce qui implique une grande valeur positive du courant de la batterie → $\bar{I}_B \gg 0$

Cependant dans le cas où le SOC est inférieur à un SOC de seuil, ici aussi on a deux cas :

- Si le réservoir d' H_2 est plein, la PàC devra alimenter la batterie afin qu'elle se charge → $\bar{I}_B < 0$.
- Tandis que, si le réservoir d' H_2 est vide, La PàC ne peut recharger la batterie, donc la batterie n'est ni recherchée ni utilisée → $\bar{I}_B = 0$

Afin de valider expérimentalement le processus de la gestion d'énergie du système hybride PàC/batterie ainsi que la gestion de la limitation des ressources par la méthode HJB, un banc d'essai a été monté, illustré dans la Fig.5.2. Il est composé d'une source de puissance émulant un stack de PàC de 18 cellules

de 500W⁷, 6 cellules de batterie de type LiFePO₄, deux convertisseurs DC/DC pour chaque source et une charge électrique dynamique émulant la puissance demandée. Le contrôle développé est implémenté dans le logiciel software LabView avec un système d'acquisition DAQ MX. L'objectif du contrôle développé est d'alimenter le système de traction émulé tout en répartissant le flux de puissance entre la PàC et la batterie. Autrement dit, l'objectif est d'asservir la tension du bus vers sa consigne et le courant de la batterie vers sa référence optimale. Une variation de la tension du bus DC de référence est appliquée en temps réel (interface LabView) de 45V à 42V pour plusieurs périodes du cycle. Le niveau d'H₂ et du SOC de la batterie (α_1 et β_2) sont émulés par l'ajustement d'une glissière dans LabView. Lorsque le niveau d'H₂ devient critique, l'approche HJB ajuste la référence du courant de la batterie selon le niveau du SOC de la batterie.

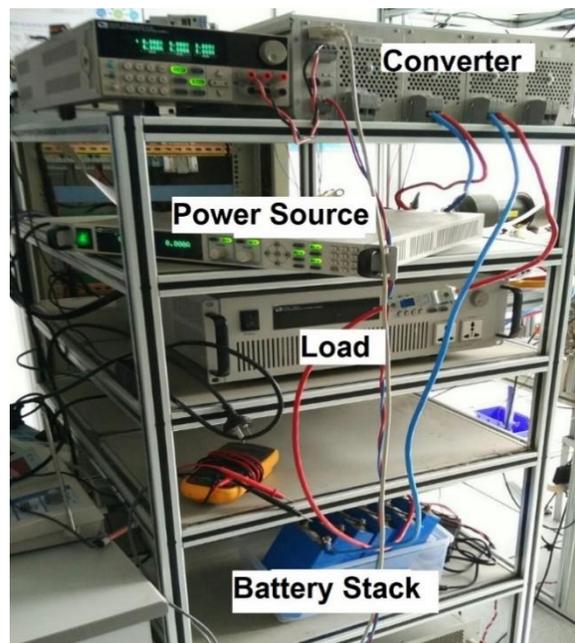


Fig.5.2. Banc d'essai expérimental PàC/Batterie de l'université de Zhejiang en Chine

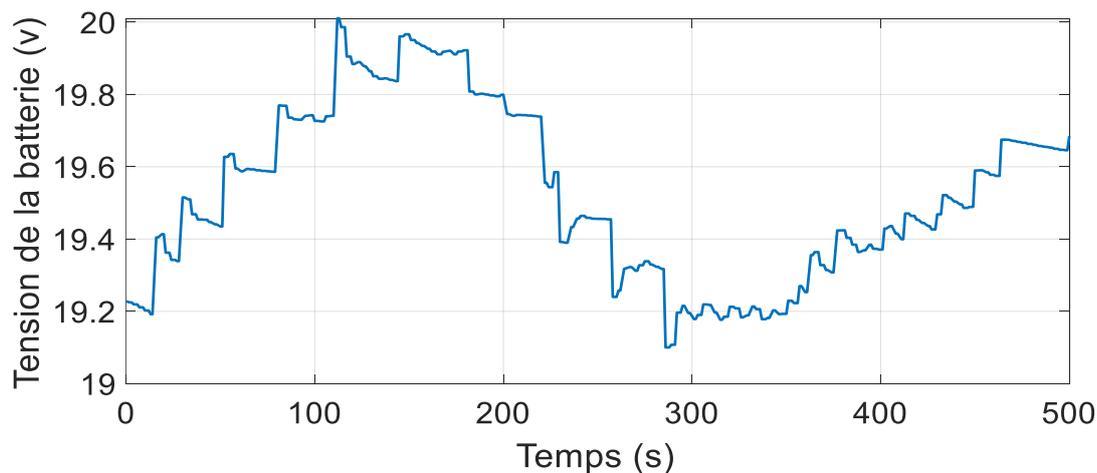


Fig.5.3 représentations de la tension de la batterie

⁷ Dans ce travail, une source de puissance est utilisée afin d'émuler le comportement de la PàC et provoquer des limitations sur la PàC.

La tension de la batterie est montrée dans la Fig.5.3. Cette tension atteint son maximum, qui correspond à une valeur de 20V. Sachant que dans l'expérimentation, on a limité la tension de la batterie entre 18.8 et 20V.

Le courant de référence de la batterie est obtenu par la méthode HJB à travers l'équation (IV.28) qui est fonction de la puissance optimale de la batterie P_B^* . Cette dernière est fonction de α_{SOC} et β_{H_2} . Par conséquent, à partir du courant de référence de la batterie obtenue, la méthode IDA-PBC force le courant de la batterie de suivre sa consigne. Ceci est montré clairement dans la Fig.5.4

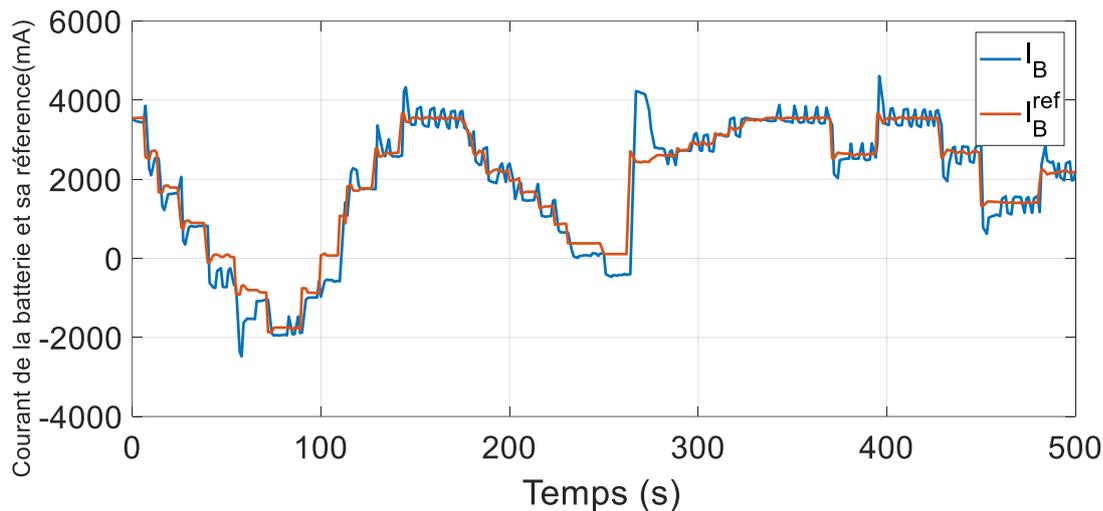


Fig.5.4 résultat expérimental du courant de la batterie et sa référence

Le courant de la batterie et sa référence obtenues par la méthode IDA-PBC et HJB, respectivement, sont représentés dans la Fig.5.4. La valeur maximale du courant de la batterie est fixée à 4A. Par conséquent, la consigne de ce courant évolue dans l'ensemble $[-2, 4]A$, où -2A implique une recharge rapide de la batterie. On peut voir clairement que le courant de la batterie suit bien sa consigne avec de légers dépassements⁸ à quelques périodes. À partir de cette figure, il est clair que le contrôle proposé force le système à suivre sa référence. Il est aussi nécessaire de rappeler que la batterie est utilisée pour fournir et/ou absorber les puissances transitoires. Aussi, la Fig.5.4 montre que la batterie peut être sollicitée en régime permanent. Par conséquent, la batterie peut fournir la quantité de la puissance manquante par la PàC. Les performances de poursuite du courant de la batterie sont bonnes avec de légers dépassements. Cela permet d'évaluer le comportement du système lors d'un passage du mode normal au mode de décharge et vice-versa.

⁸ Il est important de rappeler que les valeurs du courant de la batterie sont de l'ordre des mA, donc on peut dire que les dépassements sont négligeables.

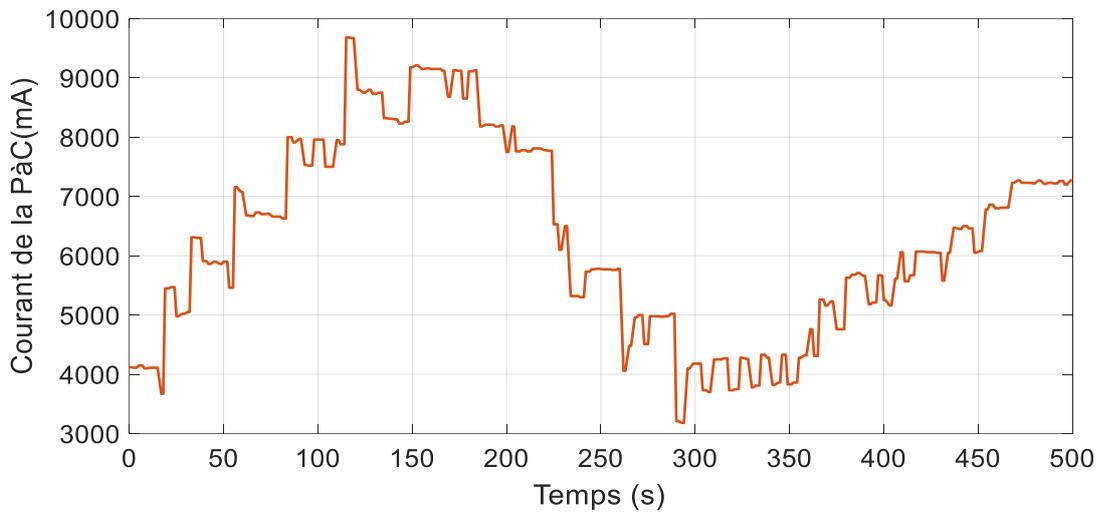


Fig.5.5 courant de la PàC

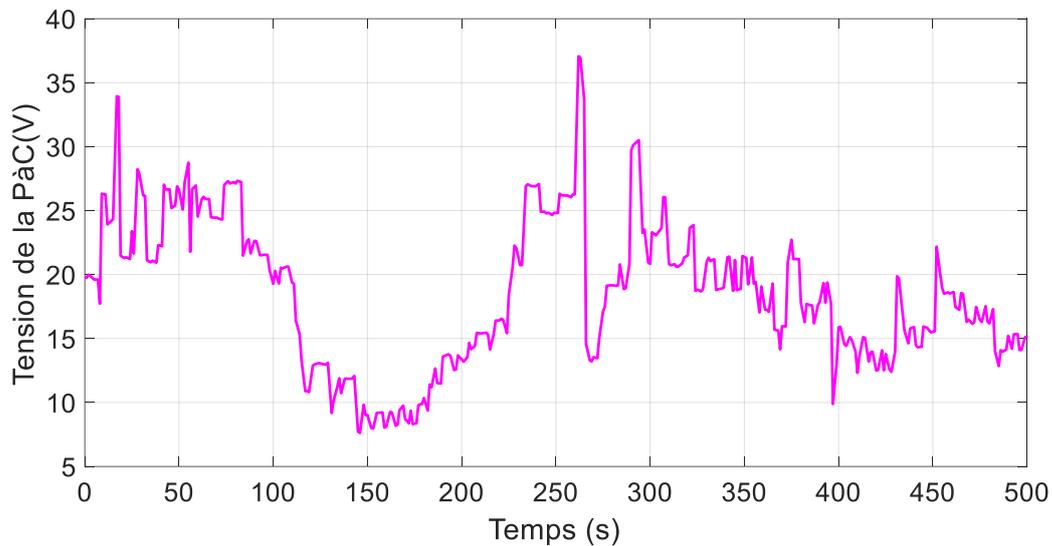
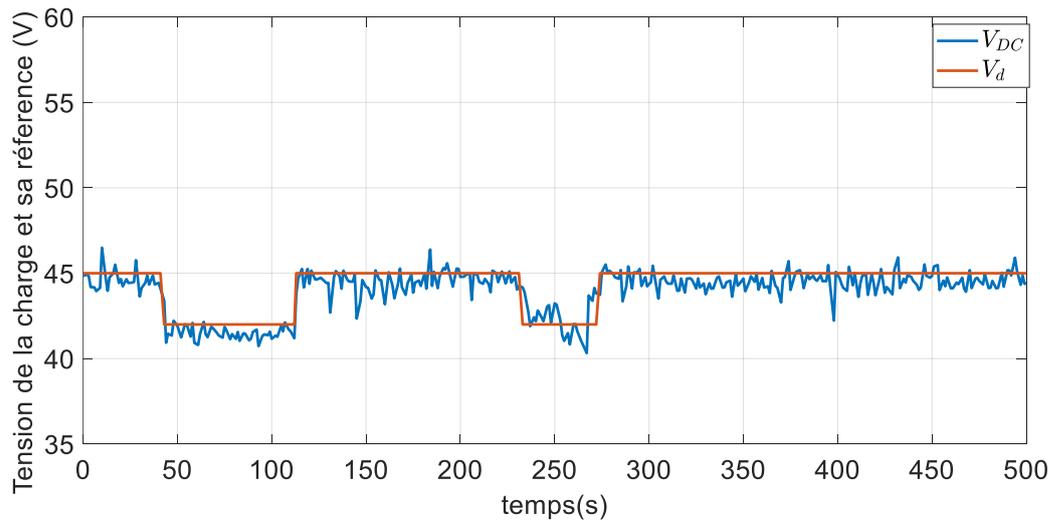
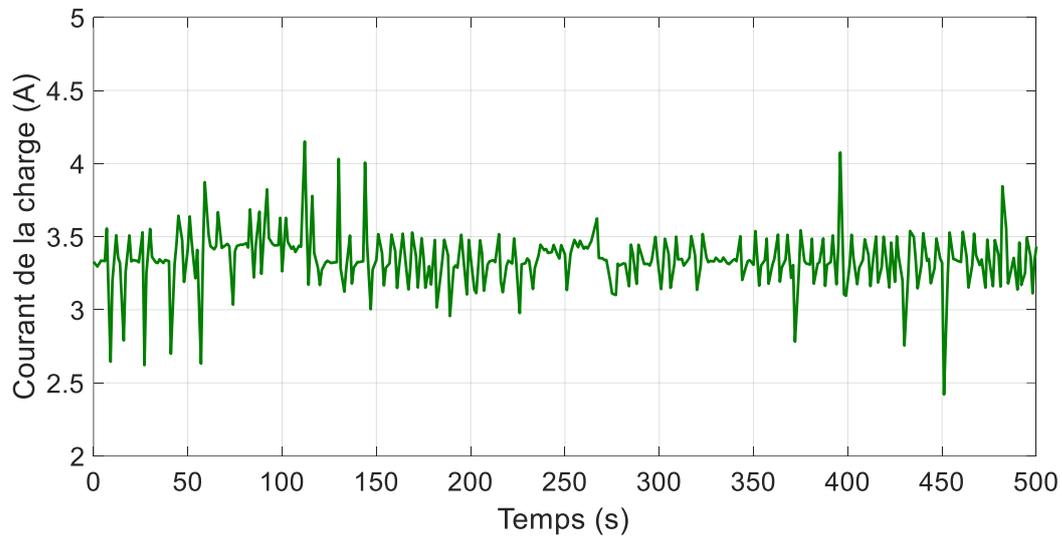


Fig.5.6 Tension de la PàC

Le comportement électrique de la PàC est montré à travers les Fig.5.5 et Fig.5.6, qui correspondent respectivement au courant et la tension de la PàC. À partir de ces figures, on peut remarquer que, quand le courant fourni par la PàC est élevé, la tension diminue et vice versa. Par exemple, quand la puissance demandée est à son maximum, le courant de la PàC est de l'ordre de 10A et sa tension diminue à une valeur autour de 8V.



(a)



(b)

Fig.5.7 Tension du bus DC et sa référence (a) et le courant de la charge (b)

Le comportement de la tension variable de bus DC et le courant de la charge durant le cycle de fonctionnement sont illustrés dans la Fig.5.7 qui montre différentes phases. La tension du bus DC est obtenue en imposant en ligne une tension de référence du bus DC variable, comme il est montré dans la Fig 5.7 (a). Donc, la tension de bus continu est asservie à une tension de référence variable durant le cycle. Par exemple, lors de la phase entre 120 et 230s, la consigne de la tension du bus DC est imposée à 45V, donc la commande IDA-PBC force le système à suivre cette référence avec de légers dépassements de l'ordre de $\pm 2V$ soit 5%. Après cela, la tension et la consigne du bus DC sont de 42V. Durant ce test, nous avons changé la tension de bus DC de 45V à 42V afin de voir le temps de réponse du système à des changements de valeurs de tension du bus DC. Par conséquent, on remarque que le système suit la référence imposée de façon instantanée avec de légers dépassements.

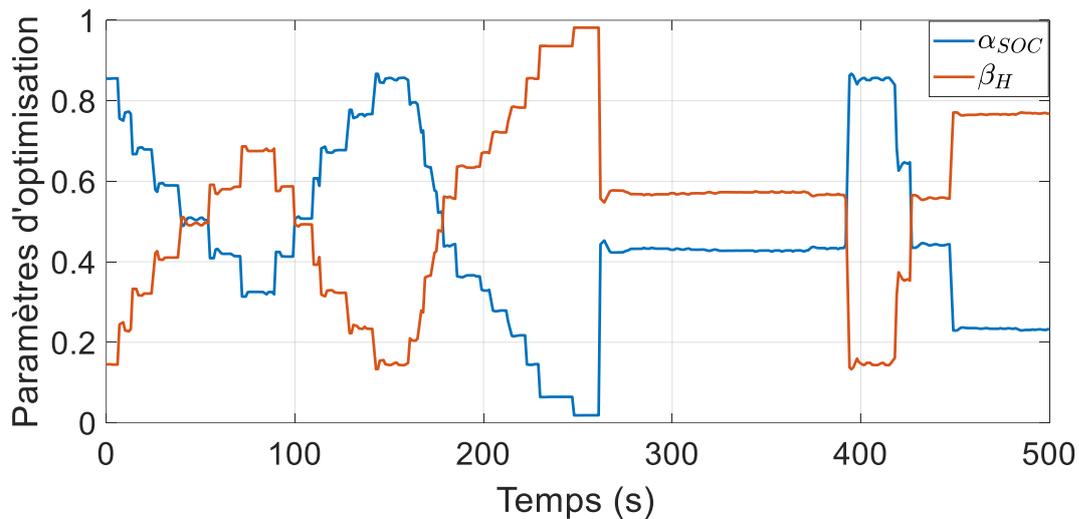


Fig.5.8 Paramètres d'optimisation

Les paramètres d'optimisation α_{SOC} et β_{H_2} sont illustrés dans la Fig.5.9 et permettent de montrer quelle source fournit plus l'énergie à la charge et à quel moment, cela selon les valeurs choisies de α_{SOC} et β_{H_2} pour chaque période. Rappelant que les valeurs de α_{SOC} et β_{H_2} prennent en considération le SOC de la batterie et le niveau d' H_2 avec $\alpha_{SOC} + \beta_{H_2} = 1$.

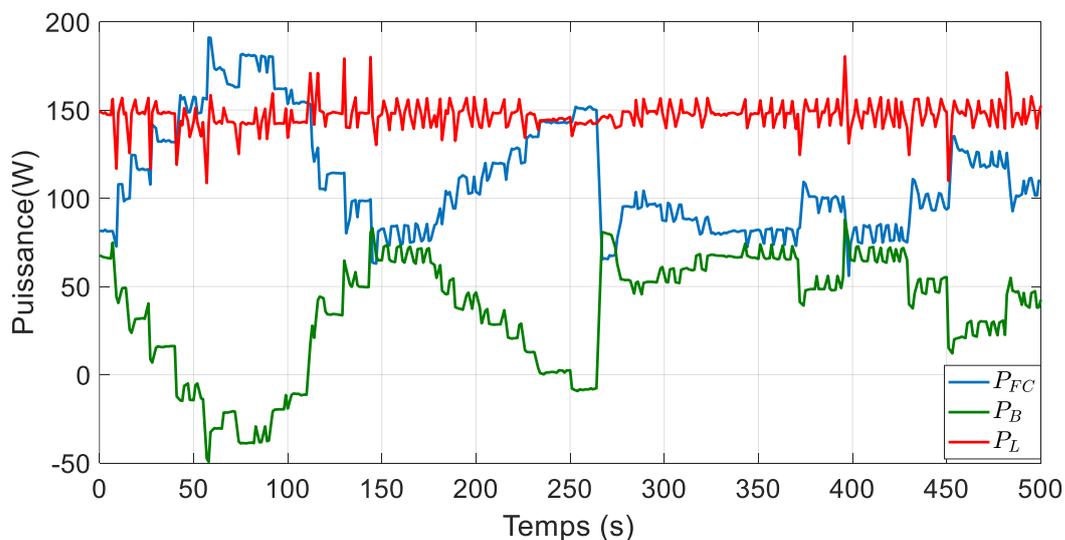


Fig.5.9 Puissances de la PàC, batterie et de la charge

La Fig.5.9 présente la puissance demandée par la charge et les puissances de la PàC et de la batterie. On peut voir que la PàC assure la majorité de la demande de la charge durant tout le cycle. La PàC peut aussi fournir la puissance à la batterie afin que cette dernière se charge. Par exemple, sur la période entre 0 et 150s, la puissance de la batterie présente des valeurs négatives. En effet, la batterie peut fournir et absorber les pics de puissance. La puissance de la charge est la somme de la puissance de la PàC et de la batterie à chaque instant. De plus, à partir de la Fig.5.9, on peut voir aussi le rôle complémentaire entre la PàC et la batterie afin de satisfaire la demande de la charge même si la source principale n'est pas apte à fournir la majorité de la puissance à la charge. Cela correspond à la période entre 270s et 420s. Par

conséquence, la puissance demandée est satisfaite tout le temps soit par la PàC seule soit par la PàC et la batterie. Ainsi, la batterie fournit une grande quantité d'énergie afin de compenser le niveau bas d' H_2 .

Cette figure est importante car elle reflète exactement le scénario proposé et illustre les avantages du contrôle proposé entre la PàC, la batterie et la charge. Ce travail a été publié [177].

5.4.3 HJB + IDA-PBC pour le système PàC/SC

5.4.3.1 Méthode HJB + IDA-PBC

La minimisation de la consommation d'hydrogène est considérée par la relation suivante :

$$\min H_2 \Leftrightarrow \min P_{FC} \Leftrightarrow \min P_{FC}^2 \quad (5.12)$$

La fonction coût qui permet d'atteindre la solution optimale pour la gestion d'énergie du système hybride est :

$$C = \alpha_{SOC2} P_{FC}^2 + \beta_{H2} P_{SC}^2 \quad (5.13)$$

avec $\alpha_2 + \beta_2 = 1$, α_2 , β_2 sont des paramètres positifs à choisir pour donner plus d'importance ou plus d'usage à une source parmi d'autres. Chacun de ces paramètres peut prendre une valeur continue comprise entre 0 et 1. Les équations qui rentrent dans le contrôle optimal sont reportées comme suit :

Critères d'optimisation	$J = \int_0^t C dt = \int_0^t (\alpha_{SOC2} P_{FC}^2 + \beta_{H2} P_{SC}^2) dt$
Contraintes	$f = P_{FC} + P_{SC} - P_L = 0$
Equation d'Hamiltonien	$H = C + \lambda^T f = \alpha_{SOC2} P_{FC}^2 + \beta_{H2} P_{SC}^2 + \lambda(P_{FC} + P_{SC} - P_L)$
Equations canonicales	$\begin{cases} H_{p_{FC}} = 2\alpha_{SOC2} P_{FC}^* + \lambda = 0 \\ H_{p_{SC}} = 2\beta_{H2} P_{SC}^* + \lambda = 0 \\ H_{\lambda} = P_{FC}^* + P_{SC}^* - P_L = 0 \end{cases}$

A partir de ces équations, la solution optimale est donnée par :

$$\begin{cases} P_{FC}^* = \frac{-\lambda}{2\alpha_{SOC2}} \\ P_{SC}^* = \frac{-\lambda}{2\beta_{H2}} \\ P_{FC}^* + P_{SC}^* = P_L \end{cases} \Leftrightarrow \lambda = -P_L \frac{2\alpha_{SOC2}\beta_{H2}}{\alpha_{SOC2} + \beta_{H2}} \quad (5.14)$$

$$P_{SC}^* = V_{SC}^* \cdot I_{SC}^* \Leftrightarrow I_{SC}^* = \frac{\alpha_{SOC2}}{(\alpha_{SOC2} + \beta_{H2})} \frac{P_L}{V_{SC}} \quad (5.15)$$

I_{SC}^* est le courant optimal de référence du SC.

Sachant que le SOC du SC est donné par l'équation suivante :

$$SOC_{SC} = \frac{V_{SC}}{V_{SCn}}$$

SOC_{SC} : Etat de charge du SC, V_{SCn} : Tension nominale du SC

$$\alpha_2 * SOC_{SC} = \alpha_{SOC}$$

$$\beta_2 * Q_{H2} = \beta_H$$

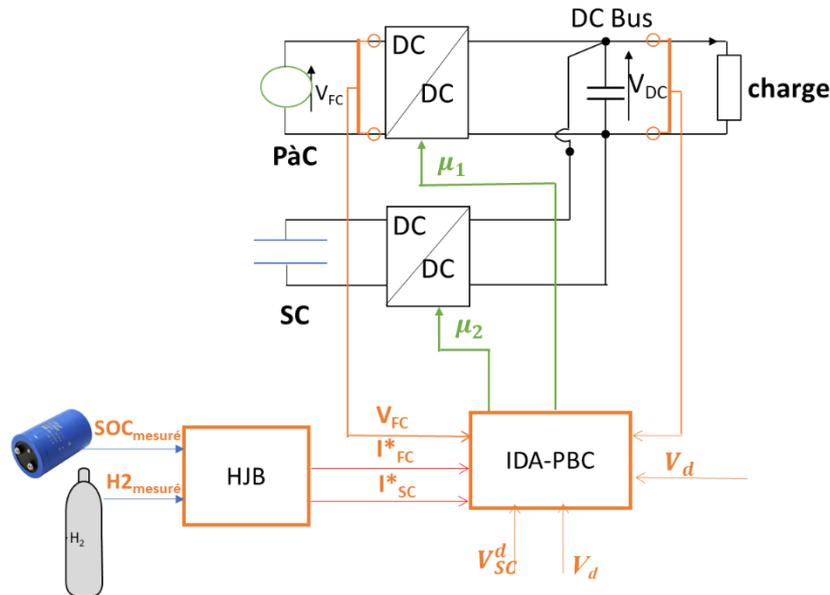


Fig. 5.10. Structure du contrôle choisi IDA-PBC+HJB pour la source PàC/SC

5.4.3.2 Validation de la commande HJB + IDA-PBC

Sur la base des caractéristiques du banc d'essai du véhicule électrique Nemo de l'Institut de recherche sur l'hydrogène (UQTR Canada) (Fig.4.24), la validation à l'échelle réduite est proposée sur une plate-forme expérimentale pour la méthode du contrôle suggérée (IDA-PBC+HJB) pour un système hybride PàC/SC. Pour la validation expérimentale, la plateforme utilisée est la même que celle de la Fig.4.25 où on a adapté la commande proposée. Afin d'éviter la répétition, la figure du banc d'essai ne sera pas présentée.

Cependant, des modifications ont été faites sur l'interface LabView afin d'implémenter la méthode d'optimisation HJB avec IDA-PBC. Le scénario de l'expérimentation consiste en le contrôle des deux convertisseurs afin d'asservir la tension du bus en gérant les limitations des sources utilisées. Dans ce travail d'expérimentation, la tension désirée du bus est modifiée en ligne sous LabView. Le SC peut fournir et absorber les pics de puissance. De plus, puisque c'est impossible en l'espace de quelques secondes de vider le réservoir d'hydrogène, la mesure en ligne le niveau d'H₂ fut émulée par une glissière au sein du logiciel LabView.

La première étape du test d'expérimentation consiste en une poursuite de la variation de la tension de référence du bus DC. Par la suite, une baisse ou augmentation du niveau d'H₂ et/ou du SOC du SC sont émulées grâce à α et β , cela afin d'observer la réponse de la commande proposée vis-à-vis de ce changement dans le but de gérer au mieux ces limitations en ressources.

Les résultats obtenus sont montrés comme suit :

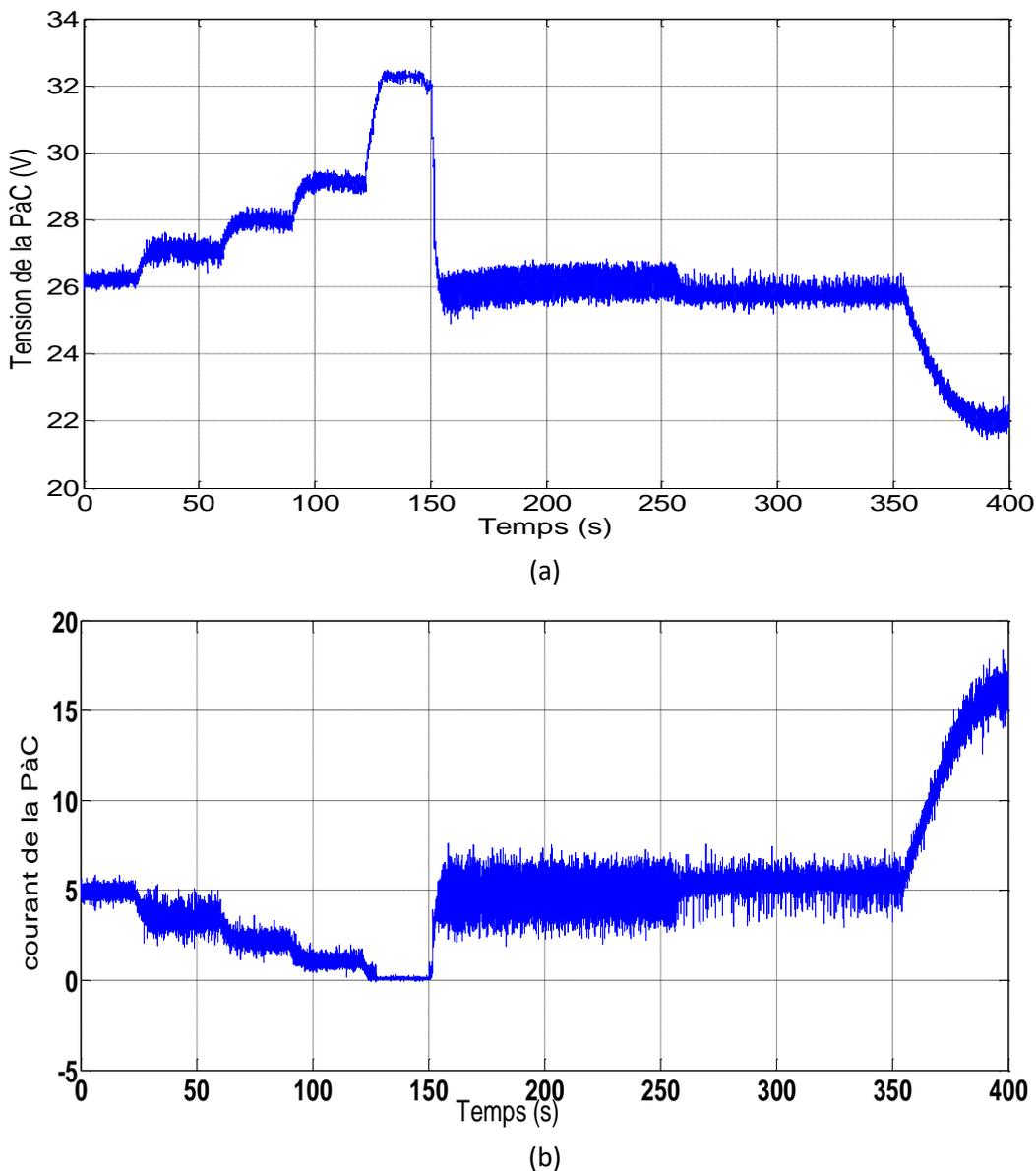


Fig.5.11 Réponse électrique de la PàC : (a) Tension de la PàC, (b) Courant de la PàC.

La réponse électrique de la PàC en appliquant l'approche IDA-PBC+HJB pour un système PàC/SC est illustrée dans les courbes de la Fig.5.11 représentant le courant et la tension de la PàC. La tension de la PàC dans l'intervalle entre $t \in [0 - 150s]$ présente un comportement en escalier⁹ de manière croissante de la valeur 26V au démarrage jusqu'à la valeur 32V (valeur maximale). Cette tension va chuter à la valeur de 26V à $t = 150s$, où elle sera par la suite stable ($V_{PàC} = 26V$) jusqu'à $t = 350s$. Après, la tension de la PàC diminue à la valeur de 22V. On peut constater que la tension de la PàC pour ce cycle est comprise entre 32V et 22V. Par ailleurs, la réponse en courant de la PàC est présentée par la courbe de la Fig.5.7(b). Le courant de démarrage de la PàC est de 5A qui diminue jusqu'à 0 A, ce qui explique la non sollicitation de la PàC entre $t \in [125 - 150s]$. Cela est dû à la diminution du niveau d'hydrogène en jouant sur le paramètre d'optimisation β en temps réel. Par la suite, la PàC est sollicitée seule pour alimenter la charge

⁹ Le comportement en escalier est dû au débit de l'hydrogène qui est représenté ici par le paramètre d'optimisation Beta.

durant la période $t \in [150 - 350s]$, où son courant correspond à la valeur de 5A. Après ce courant augmente à 15A. Cet appel de courant qui est observé après $t = 350s$ est dû au rôle de la PàC pour la recharge du SC.

Grace à un débit mètre qui est installé dans le banc d'essai, on a pu tracer la courbe du courant de la PàC et le débit d'H₂.

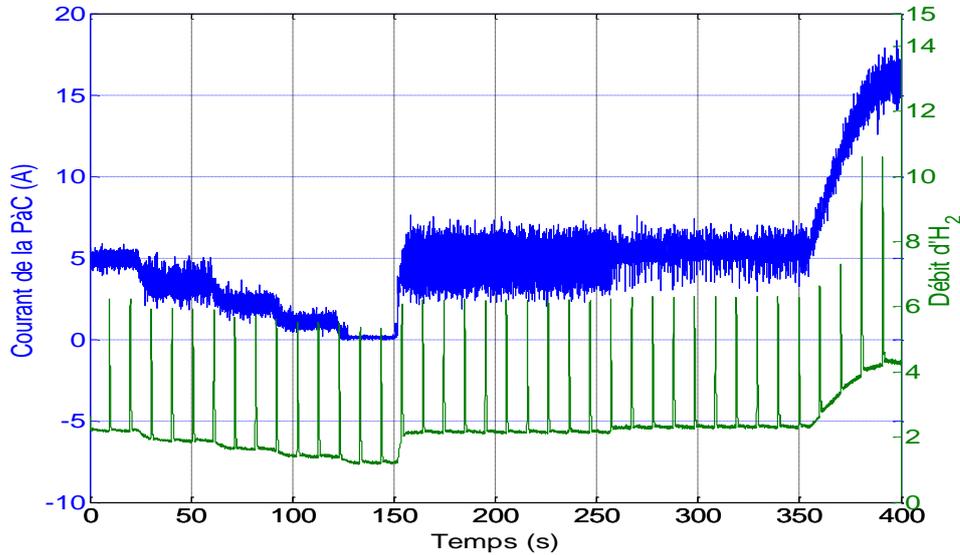


Fig.5.12 Courant de la PàC et le débit d'hydrogène

La Fig.5.12 illustre l'évolution du courant de la PàC et le débit d'hydrogène et montre que lorsque le courant de la PàC diminue le débit d'hydrogène diminue aussi et inversement proportionnel. Les pics observés dans la Fig.5.12 dans l'axe du débit d'H₂ (courbe verte) correspondent au processus de purges, qui est effectué par pas de 10s.

pour

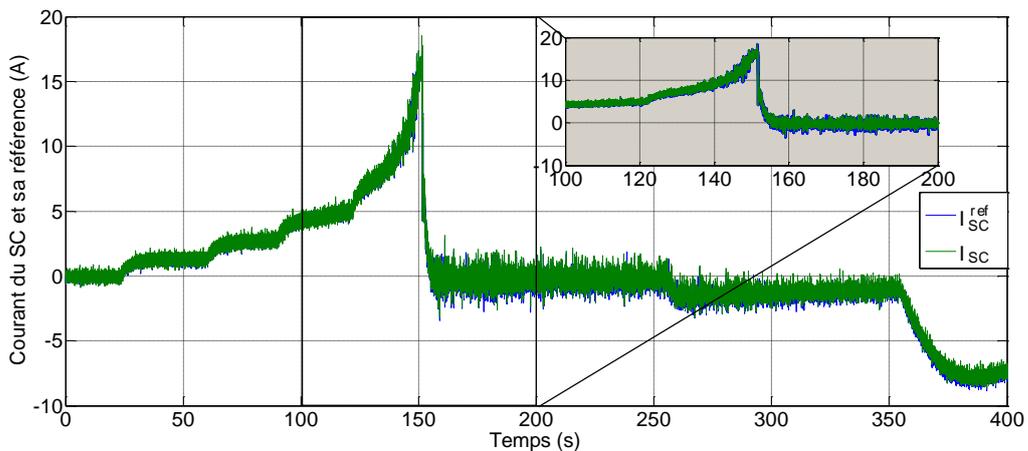


Fig.5.13 Courant du SC et sa référence

L'évolution du courant du SC issu de la référence calculée par le contrôle optimale HJB (IV.15) est présentée dans la Fig.5.13. Cette dernière montre que le courant du SC suit parfaitement sa référence

avec une erreur presque nulle. Ceci est clairement montré dans le zoom de la Fig.5.13. Le courant maximum atteint est de l'ordre de 18A qui est obtenu à l'instant $t = 150s$, ceci est dû à l'appel du courant de la charge (voir Fig.5.16(a)). Par la suite, le courant du SC est égal à 0A jusqu'à l'instant $t = 250s$. Après cela il présente une valeur négative qui atteint -7A.

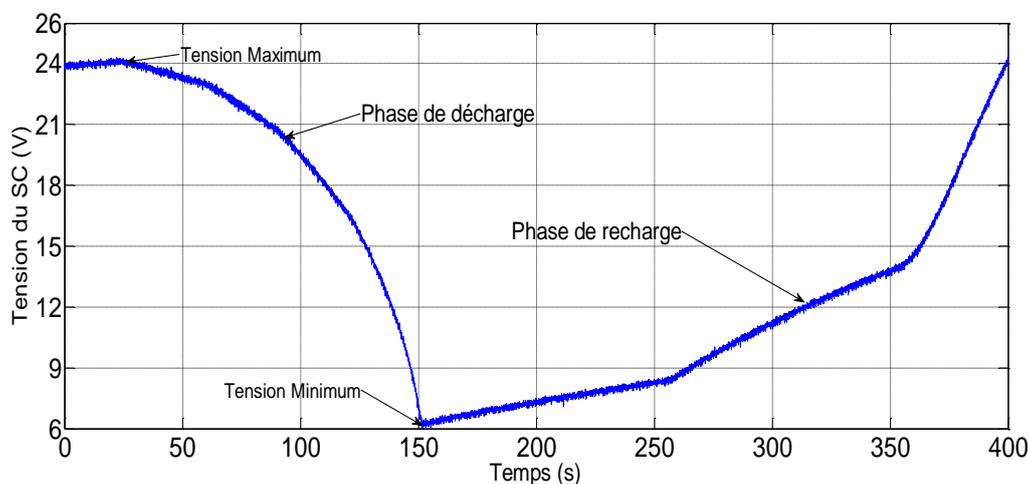


Fig.5.14 Tension du SC

La tension du SC est illustrée sur la Fig.5.14, qui montre les différentes phases du fonctionnement du SC. Au démarrage, la tension du SC est à son maximum de 24V. La sollicitation du SC pour l'alimentation de la charge conduit à la décharge du SC jusqu'à une valeur de 6V à $t = 150s$. Après un instant, le SC passe à l'étape de recharge par la PàC progressivement, jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur initiale c'est-à-dire 24V.

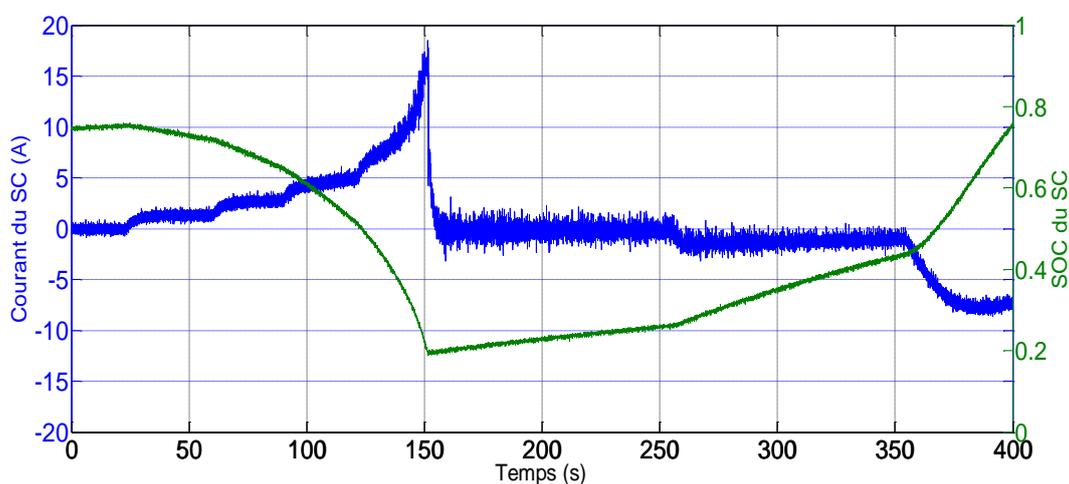
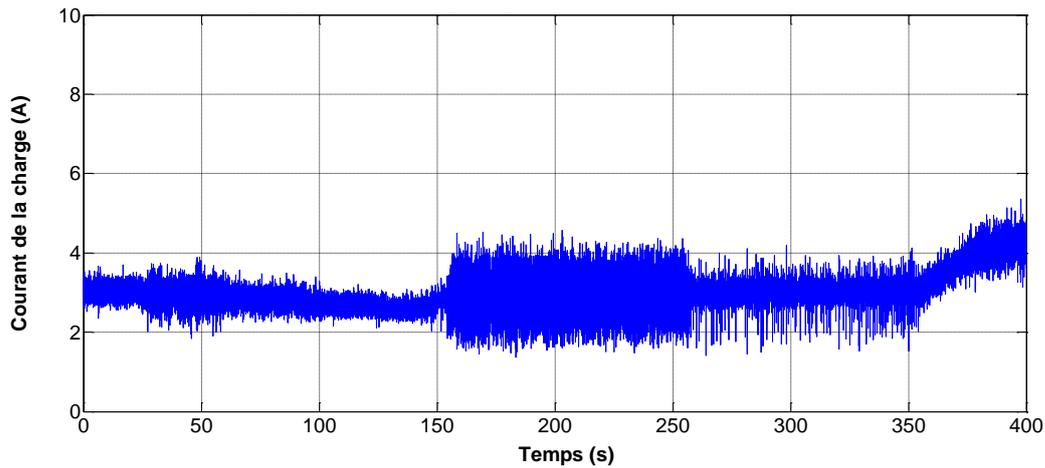
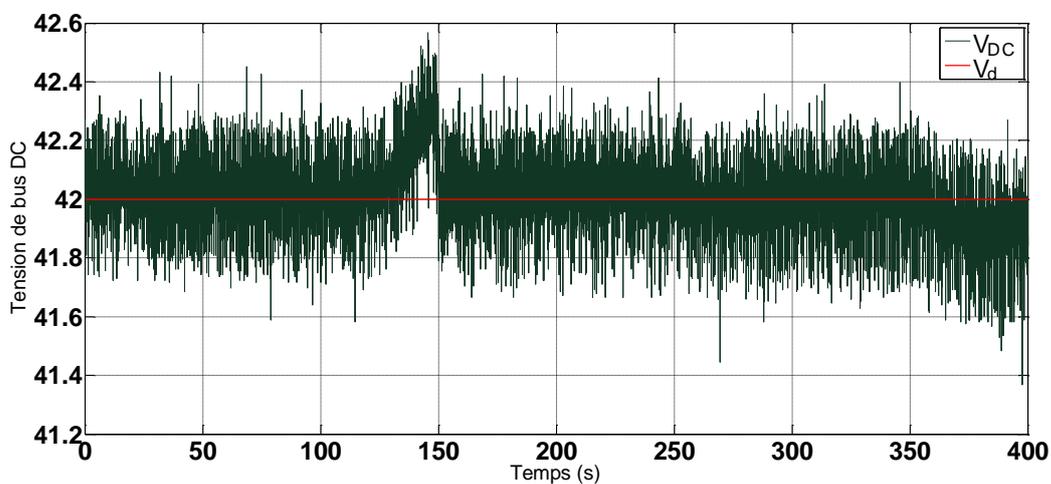


Fig.5.15 Courant du SC et son SOC

Le comportement du SC durant le cycle est bien montré sur la Fig.5.15, qui représente le courant et le SOC SC. Il est constaté que le SOC du SC est compris entre 20 et 80%. Au démarrage, le SOC du SC est autour de 80%. Quand le SC est déchargé, c'est à dire quand il est sollicité, son SOC diminue jusqu'à un pourcentage de 20, (la valeur du SOC est de l'ordre de 20%), ceci s'applique à $t = 150s$. Par la suite, le niveau du SOC augmente jusqu'à la valeur 80% initiale comme montré sur la Fig.5.15.



(a)



(b)

Fig.5.16 courant de la charge (a), tension du bus DC et sa tension désirée (b)

La Fig.5.16 illustre le résultat expérimental du courant de la charge ainsi que la tension du bus DC V_{DC} et sa référence V_d . L'évolution du courant de la charge est reporté sur la Fig.5.16 (a) qui montre les appels de courant de la charge.

Pour ce test, nous avons imposé une tension du bus invariante de l'ordre de 42V et nous allons voir la réponse du système. On constate à partir de cette figure que la tension du bus DC suit bien la référence imposée avec des dépassements observés convenables. L'erreur entre la tension du bus et sa consigne est autour de $\pm 0.0V$, qui est une valeur acceptable. Ceci permet de conclure que l'approche proposée (IDA-PBC+HJB) pour cette étude a satisfait l'un des objectifs de la commande qui est la stabilisation de la tension de sortie du bus autour de sa valeur désirée.

Afin de montrer quelle source (PàC et/ou SC) est utilisée et à quelle période du cycle en fonction de son état de charge, nous avons tracé les paramètres d'optimisation α_{SOC} et β_H (voir Fig.5.13). Ces derniers peuvent prendre des valeurs de 0 à 1.

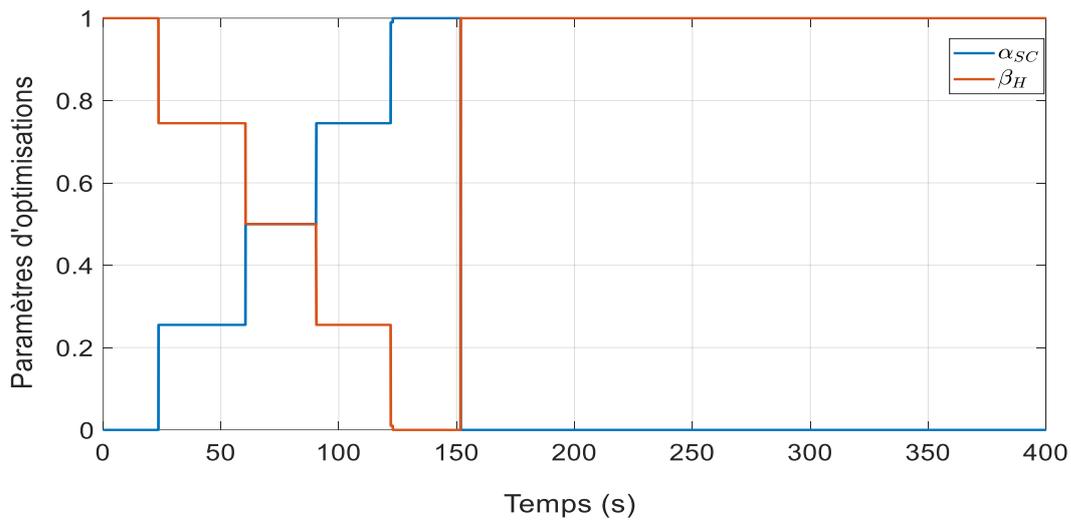


Fig.5.17 Paramètres d'optimisation de la PàC et du SC

La Fig.5.17 illustre les fonctions coûts de l'utilisation de l'hydrogène et du SC à partir des paramètres d'optimisation qui sont fonction de leurs états de charge, cela afin de superviser les ressources de manière optimale. Lors du test expérimental, à partir de l'interface LabView, nous avons émulé en ligne les paramètres d'optimisation qui sont liés directement aux niveaux d'H₂ et du SOC du SC, et cela afin de vérifier la réponse de la méthode HJB avec la commande IDA-PBC. Cette figure est importante et permet de comprendre la réponse de la commande optimale donc le comportement des sources utilisées face à des contraintes de limitation.

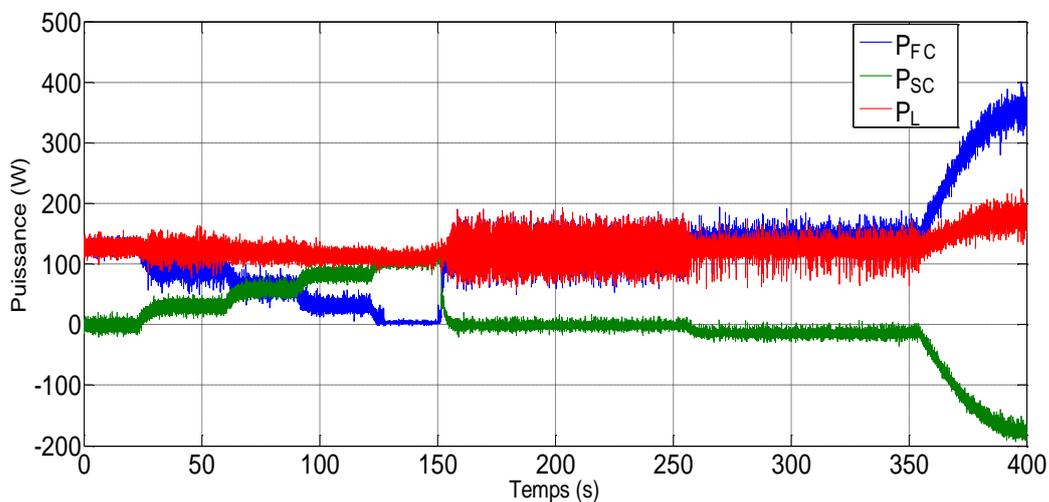


Fig.5.18 puissances de la PàC, SC et de la charge

La Fig. IV.18 reporte la puissance de la charge et les puissances fournies par la PàC et le SC dans l'intervalle de temps $t \in [0 - 400s]$. Il est constaté que la puissance demandée par la charge est comprise entre $[0 - 200W]$. On peut voir qu'au début entre $[0 - 25s]$, la PàC alimente seule la demande en énergie de la charge d'où la $P_{SC} = 0$. Par la suite, en modifiant en ligne les paramètres d'optimisation alpha et beta, on a diminué le niveau d'H₂ (émulé) afin que le SC fournisse plus d'énergie pour compenser le niveau bas d'H₂. Cela a permis de voir le comportement de la commande lorsqu'on est face à une telle

contrainte. Ceci permet d'expliquer le comportement en escalier entre $[25s - 150s]$ de la puissance de la PàC et du SC. Durant la période $[150 - 250s]$, la PàC reprend son rôle de source principale jusqu'à $t = 250s$. Après cela, en plus de son rôle de source principale, la PàC alimente le SC afin de le recharger car son SOC est de l'ordre de 20% jusqu'à 80%. Il est également important de noter qu'après $t = 350s$, la puissance de la PàC est presque 2 fois supérieure à celle de la charge. Cette allure est obtenue en donnant des valeurs en ligne aux paramètres d'optimisation afin de voir la réponse du système face aux contraintes imposées. On peut clairement voir que durant cette phase, la PàC joue parfaitement son rôle comme source principale. On peut constater aussi que le long de tout le cycle, la puissance de la charge est la somme de la puissance SC et PàC. Cette figure est importante et reflète le scénario proposé et illustre la faisabilité du contrôle optimal proposé pour la source PàC/SC.

5.4.4 HJB + IDA-PBC pour le système PàC/Batterie/SC

L'idée proposée dans cette section est de combiner deux stratégies différentes qui sont la méthode IDA-PBC (aborder dans le chapitre 4) et la technique HJB pour la gestion optimale de l'énergie du système hybride PàC/Batterie/SC. La technique HJB permet de trouver la référence énergétique optimale à partager entre les sources en temps réel, en tenant compte des limitations des sources utilisées. La méthode IDA-PBC assure le contrôle et le suivi de l'énergie de chaque source à sa référence tout en garantissant la stabilité de la fonction d'énergie globale (fonction de Lyapunov), où le minimum est à son équilibre désiré. Par conséquent, l'approche IDA-PBC permet la modification de la matrice d'amortissement du système hybride afin que les courants des sources suivent leurs consignes obtenues par la méthode HJB. Cette étude est la première qui combine le contrôle non linéaire basé sur la passivité avec le contrôle optimal basé sur l'optimisation HJB. Cette nouvelle combinaison permet une gestion optimale de l'énergie en considérant la supervision des ressources restantes principalement la quantité d'hydrogène au niveau du réservoir d'hydrogène de la PàC et du SOC de la batterie et du SC. Par conséquent, cette approche permet de minimiser la consommation d'hydrogène. D'autre part, l'aspect économique de l'utilisation des sources peut être introduit afin de définir le profil de déplacement en minimisant les consommations. L'objectif de ce travail est de développer les lois de contrôle en utilisant l'IDA-PBC et HJB, afin de :

- Contrôler la tension du bus DC par l'intermédiaire des convertisseurs des sources utilisées.
- Augmenter la durée de vie de la PàC en limitant sa sollicitation, en faisant appel aux sollicitations de la batterie et du SC.
- La batterie et/ou le SC satisfera la demande de la puissance de la charge dans les phases transitoires.
- Tout cela, en tenant compte des limitations des sources embarquées et en fournissant la preuve de stabilité globale pour ce système.

5.4.4.1 Méthode HJB + IDA-PBC

La Fig.1V.15 représente la structure globale du contrôle optimal utilisé pour un système hybride PàC/Batterie/SC. Dans ce schéma, les consignes des courants de sources sont générées par la méthode HJB et qui sont données par les équations (VI.26). Ces courants sont déterminés en fonction du niveau d' H_2 , du SOC de la batterie ainsi que la puissance de la charge. Donc, l'application de la méthode HJB est sous forme continue, sans connaître le cycle afin de superviser les ressources de manière optimale. Pour cela, les fonctions coûts de l'utilisation de l'hydrogène, de la batterie et du SC sont déterminées. Par conséquent, la supervision des ressources est effectuée.

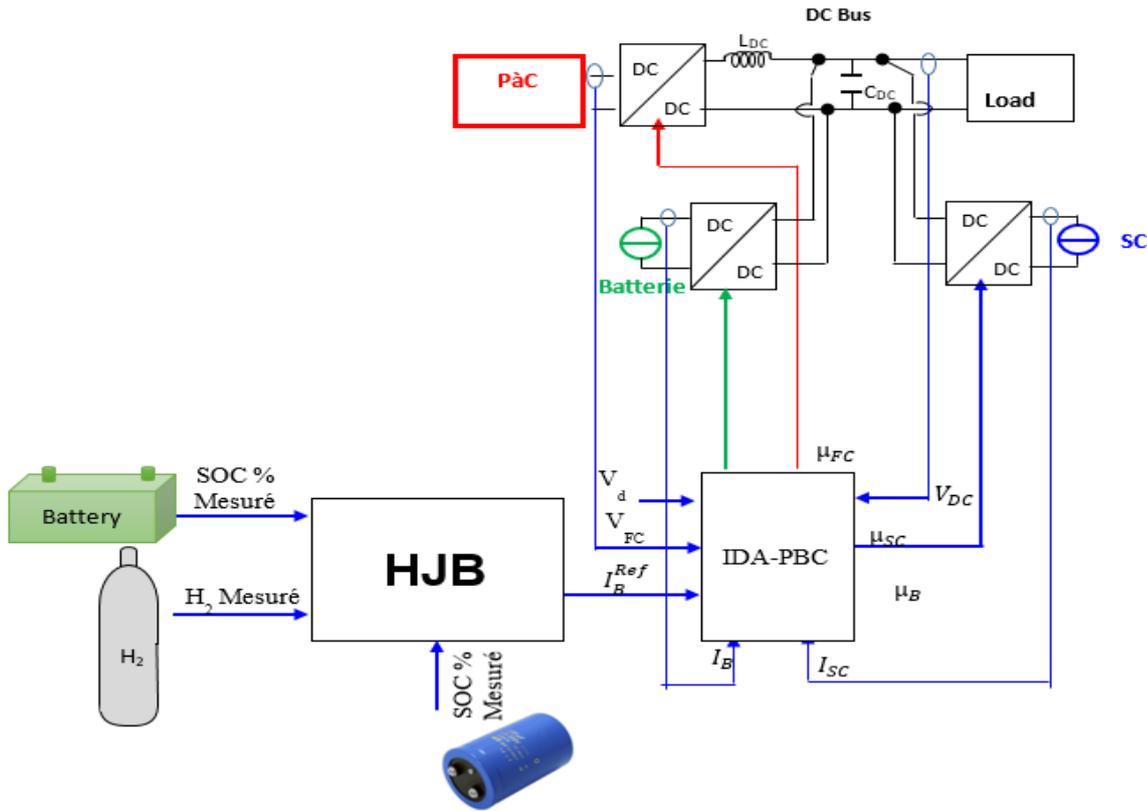


Fig.5.19 Schéma du contrôle optimal proposé de la structure hybride PàC/Batterie/SC

La minimisation de la consommation d'hydrogène est considérée comme la principale tâche pour l'optimisation au niveau de la PàC. Ceci peut correspondre à la minimisation de la puissance de la PàC et par conséquent de la puissance au carrée.

$$\min H_2 \Leftrightarrow \min P_{FC} \Leftrightarrow \min P_{FC}^2$$

Considérant (5.16), la fonction coût qui permet d'atteindre la solution optimale pour la gestion d'énergie du système hybride PàC/Batterie/SC :

$$C = \alpha_3 P_{FC}^2 + \beta_3 P_{Batt}^2 + \gamma_3 P_{SC}^2 \quad (5.16)$$

Avec $\alpha_3 + \beta_3 + \gamma_3 = 1$

$\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ sont des paramètres positifs, choisis afin de donner plus importance ou plus usage pour chaque source. Chacun de ces paramètres est normalisé et peut prendre une valeur continue comprise entre 0 et 1.

a. Critère d'optimisation :

$$J = \int_0^t C dt = \int_0^t (\alpha_3 P_{FC}^2 + \beta_3 P_{Batt}^2 + \gamma_3 P_{SC}^2) dt \quad (5.17)$$

b. Contraintes :

L'équation de contrainte décrit la relation entre la puissance demandée pour propulser le véhicule, la puissance de la PàC, la puissance du SC et la puissance de la batterie. Elle peut être donnée par la relation suivante :

$$f = P_{FC} + P_{Batt} + P_{SC} - P_L = 0 \quad (5.18)$$

c. Equations d'Hamiltonien :

La fonction d'Hamiltonien utilisée lie la fonction coût et les contraintes à travers le multiplicateur de Lagrange λ [167], elle est donnée par (5.19).

$$H = C + \lambda^T f = \alpha_3 P_{FC}^2 + \beta_3 P_{Batt}^2 + \gamma_3 P_{SC}^2 + \lambda(P_{FC} + P_{Batt} + P_{SC} - P_L) \quad (5.19)$$

d. Equations canoniques :

La théorie du contrôle optimale exige que la condition nécessaire soit donnée lorsque la variation de la mesure de performance est nulle [42], ce qui donne les équations canoniques suivantes :

$$\begin{cases} H_{p_{FC}} = 2\alpha_3 P_{FC}^* + \lambda = 0 \\ H_{p_{Batt}} = 2\beta_3 P_{Batt}^* + \lambda = 0 \\ H_{p_{SC}} = 2\gamma_3 P_{SC}^* + \lambda = 0 \\ H_\lambda = P_{FC}^* + P_{Batt}^* + P_{SC}^* - P_L = 0 \end{cases} \quad (5.20)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} P_{FC}^* = \frac{-\lambda}{2\alpha_3} \\ P_{Batt}^* = \frac{-\lambda}{2\beta_3} \\ P_{SC}^* = \frac{-\lambda}{2\gamma_3} \\ P_{FC}^* + P_{Batt}^* + P_{SC}^* = P_L \end{cases} \quad (5.21)$$

Après calculs, la solution est donnée par :

$$\lambda = -P_L \frac{2\alpha_3\beta_3\gamma_3}{\beta_3\gamma_3 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_3\beta_3} \quad (5.22)$$

Ainsi les références optimales pour chacune des puissances des sources sont données en fonction de la puissance de la charge et des facteurs de pondérations $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$.

$$\Leftrightarrow \begin{cases} P_{FC}^* = \frac{\beta_3\gamma_3}{\beta_3\gamma_3 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_3\beta_3} P_L \\ P_{Batt}^* = \frac{\alpha_3\gamma_3}{\beta_3\gamma_3 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_3\beta_3} P_L \\ P_{SC}^* = \frac{\alpha_3\beta_3}{\beta_3\gamma_3 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_3\beta_3} P_L \\ P_{FC}^* + P_{Batt}^* + P_{SC}^* = P_L \end{cases} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} P_{Batt}^* &= V_{Batt}^* \cdot I_{Batt}^* \\ P_{SC}^* &= V_{SC}^* \cdot I_{SC}^* \\ P_{FC}^* &= V_{FC}^* \cdot I_{FC}^* \end{aligned} \quad (5.24)$$

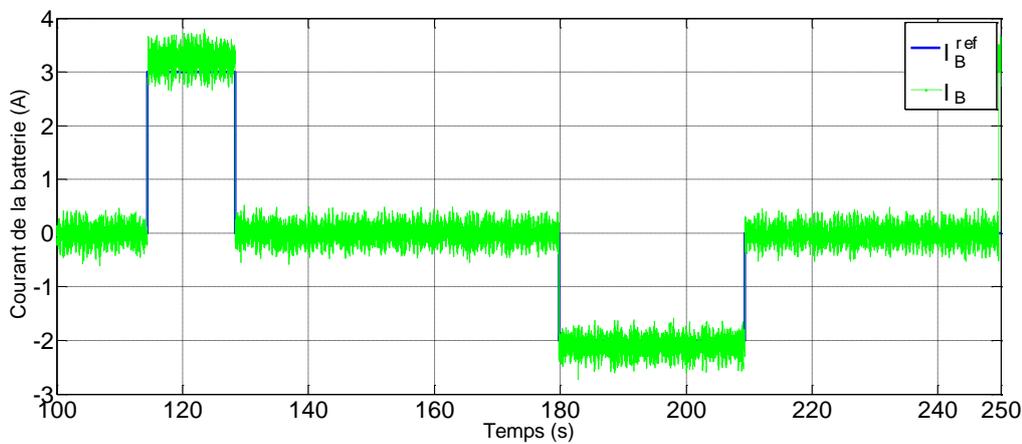
$$\begin{aligned} I_{Batt}^* &= \frac{\alpha_3\gamma_3}{\beta_3\gamma_3 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_3\beta_3} \frac{P_L}{V_B} \\ I_{SC}^* &= \frac{\alpha_3\beta_3}{\beta_3\gamma_3 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_3\beta_3} \frac{P_L}{V_{SC}} \\ I_{FC}^* &= \frac{\beta_3\gamma_3}{\beta_3\gamma_3 + \alpha_3\gamma_3 + \alpha_3\beta_3} \frac{P_L}{V_{FC}} \end{aligned} \quad (5.25)$$

I_{Batt}^* est le courant de référence optimal qui devra jouer le rôle de \bar{x}_5 et sera introduit par la suite dans le contrôle proposé par IDA-PBC. I_{SC}^* est le courant de référence optimal qui sera introduit dans le contrôle proposé par IDA-PBC comme \bar{x}_3 ¹⁰.

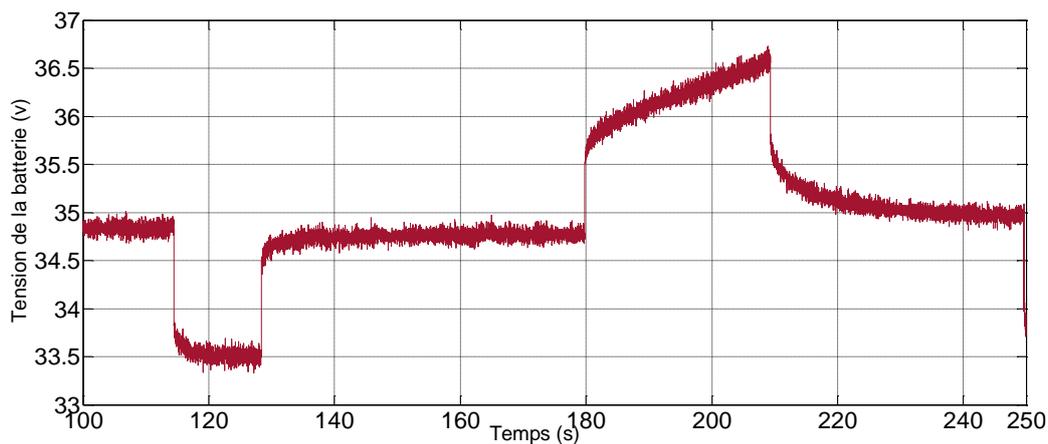
Les courants optimaux de référence des sources auxiliaires (SC et batterie) calculés par HJB sont fonction de la puissance instantanées de la charge et les tensions de la batterie ou du SC. la connaissance préalable du profile de charge n'est pas nécessaire.

5.4.4.2 Validation de la commande HJB + IDA-PBC

Afin de valider le contrôle proposé concernant la combinaison entre IDA-PBC et le contrôle optimal HJB pour le système hybride PàC/Batterie/SC, un banc d'essai est développé qui est le même montré dans la Fig. 4.36. L'expérimentation a été effectuée à l'IRH, de l'Université UQTR, au Canada. Les résultats obtenus pour l'application de l'approche IDA-PBC+HJB pour une source PàC/batterie/SC sont présentés dans un intervalle de temps entre $t \in [100s - 250]$ et ils sont montrés dans les figures qui suivent :



(a)



(b)

Fig.5.20 Variables électriques de la batterie : courant et sa référence (a) tension (b)

¹⁰ \bar{x}_3 et \bar{x}_5 correspondent aux courants du SC et de la batterie, respectivement (voir le vecteur d'état de la section (4.2.3.1)).

Les courbes de la Fig.5.20 représentent le courant et la tension de la batterie utilisée dans le système hybride PàC/Batterie/SC d'ordre 6 (voir la section 4.2.3.1). La courbe du courant de la batterie et sa référence dans la Fig.5.20(a) montre que le courant de la batterie suit bien sa consigne avec des dépassements de l'ordre $\pm 0.2A$. À partir de la Fig. 5.20(a), on peut remarquer différents modes de fonctionnement de la batterie durant l'intervalle $[100s - 250s]$. Le courant de la batterie dans l'intervalle de temps $[100s - 118s]$ est nul, la batterie n'est pas sollicitée. Durant la période $[118s - 130s]$, la batterie fournit de l'énergie à la charge, son courant est de l'ordre de 3A. Par ailleurs, Durant $[180s - 210s]$, le courant de la batterie est négatif (-3A) \rightarrow la batterie se recharge. La Fig.5.20(a) montre aussi que le courant de la batterie suit sa consigne imposée avec une erreur de l'ordre de $\pm 0.1A$ et cela durant le cycle. La tension équivalente de la batterie est reportée dans la Fig.5.20 (b), où on observe qu'elle est entre 36.5 V et 33.5V dans l'intervalle de temps $[100s - 250s]$. Lorsque la batterie est sollicitée pour l'alimentation de la charge en énergie par exemple dans la période $[100s - 118s]$, sa tension diminue de 34.9V jusqu'à 33.5V. Alors que dans l'intervalle $[180s - 210s]$, la batterie est rechargée en temps réel par la PàC et sa tension augmente de 35.5V à 36.5V. Hors ces périodes, la tension de la batterie est de l'ordre de 34.8Vs.

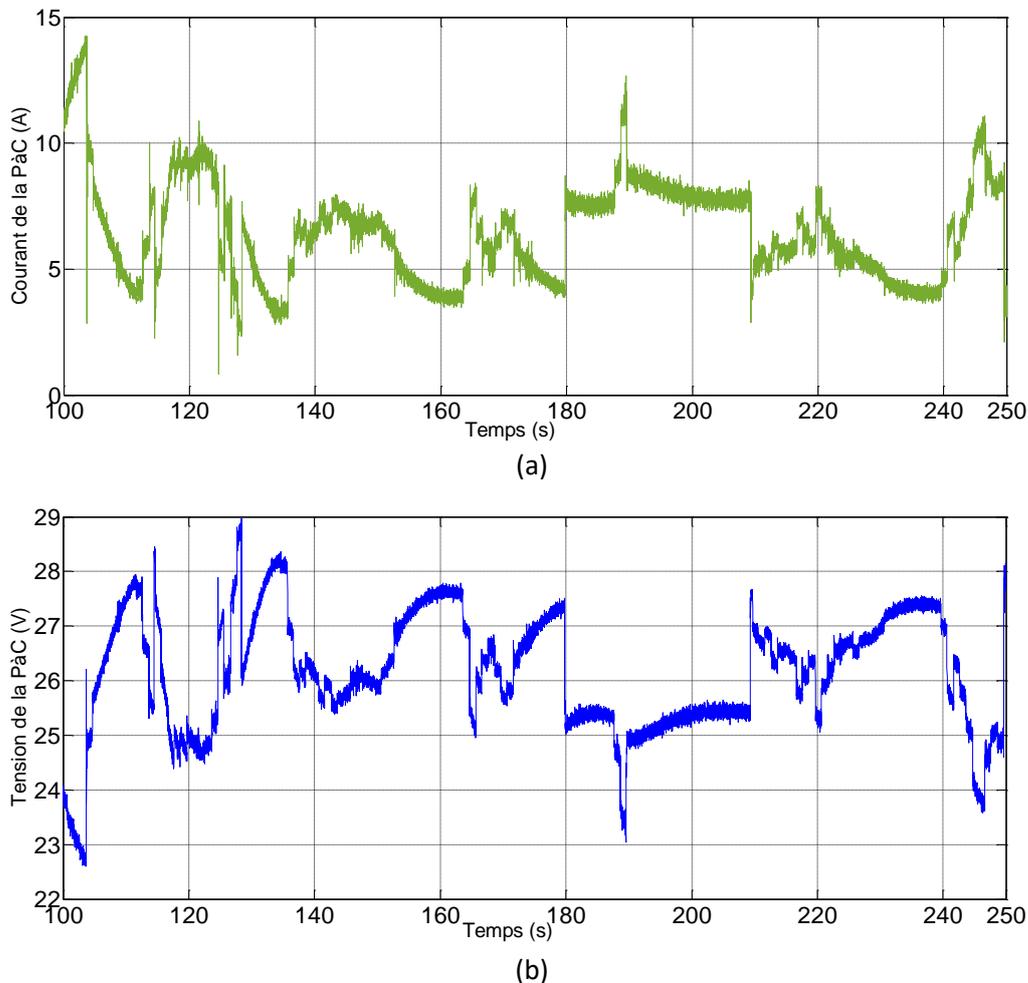


Fig.5.21 Représentation du courant (a) et la tension de la PàC (b).

La réponse électrique de la source PàC est illustrée dans les courbes de courant et de tension de la Fig.5.21. Le comportement du courant est montré sur la Fig.5.21 (a) où il atteint son maximum à une valeur de 14A à l'instant $t = 105s$. On remarque que le courant de la PàC présente un comportement

lisse comparativement à celui du SC (voir Fig.5.21). La tension de la PàC est représentée dans la Fig.5.21 (b), elle varie entre 22.5 V et 29V pour l'intervalle de temps [100s – 250s].

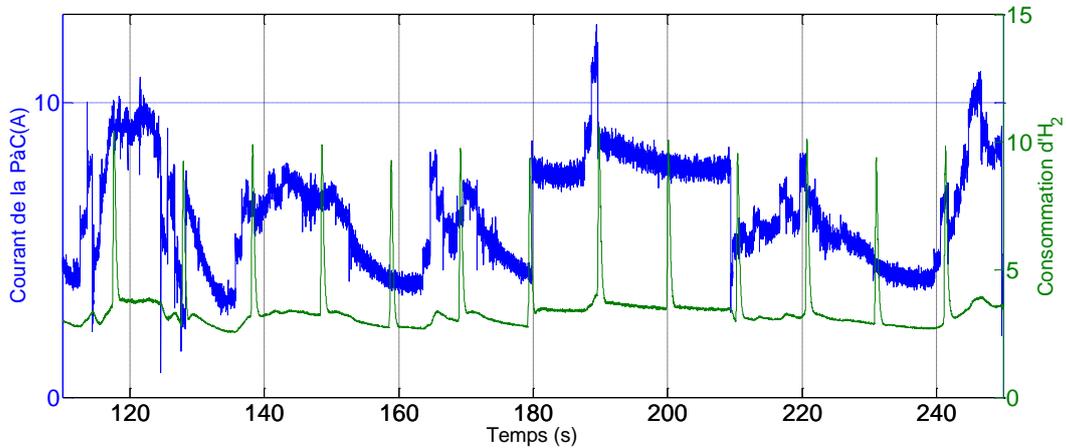
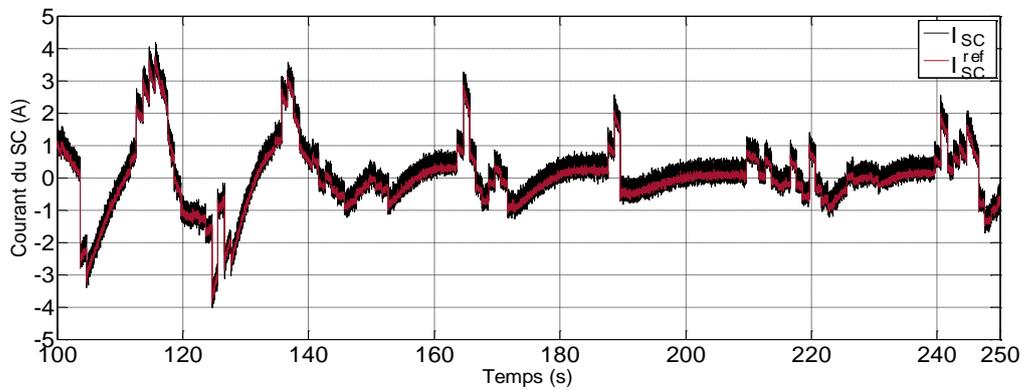
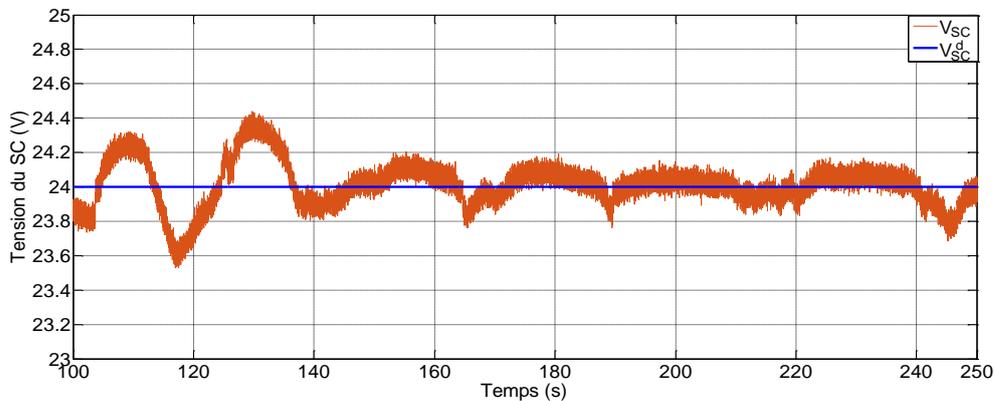


Fig.5.22 Représentation du courant de la PàC et consommation d'H2

Le niveau de la consommation de l'hydrogène est indiqué dans la Fig.5.22, et montre un comportement proportionnel entre le courant de la PàC et le niveau de d'hydrogène. C'est à dire que lorsque le courant de la PàC augmente (PàC fournit de l'énergie), la consommation de l'H₂ augmente et vice versa. Le processus de la purge programmé automatiquement chaque 10s, qui est observable par des pics dans la courbe verte.



(a)



(b)

Fig.5.23. Le courant du SC et sa référence (a) et la tension du SC (b)

Le courant du SC et sa référence sont représentés dans la Fig.5.23 (a) et montre la poursuite de sa consigne qui est déduite par la méthode d'optimisation HJB. Le contrôle développé force le courant du SC à suivre sa référence parfaitement sans dépassement. De plus, la valeur maximale du courant du SC est autour de 4A. La tension du SC et sa référence sont illustrées dans la Fig.5.23 (b). La tension du SC désirée est de 24V qui correspond à la tension nominale du SC. On observe clairement que le contrôle proposé force la tension du SC à suivre sa consigne. Les dépassements observés sont aux alentours de $\pm 0.4V$, qui est une valeur acceptable.

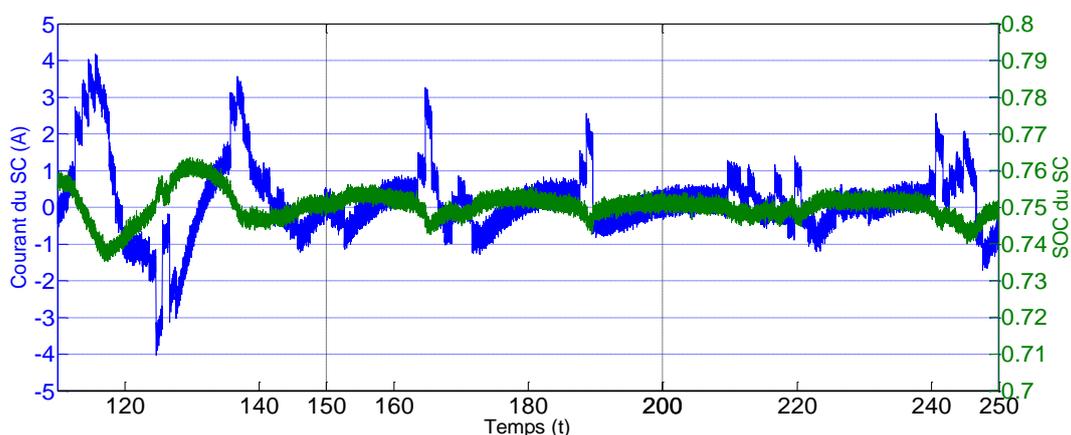
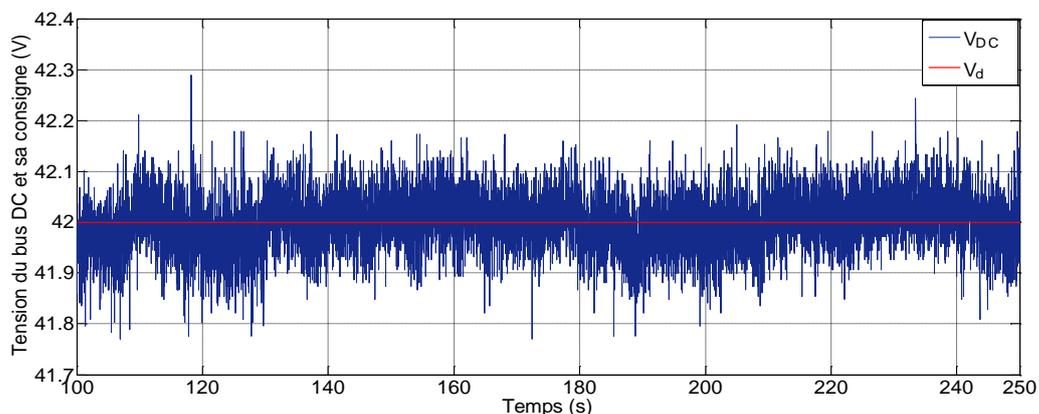
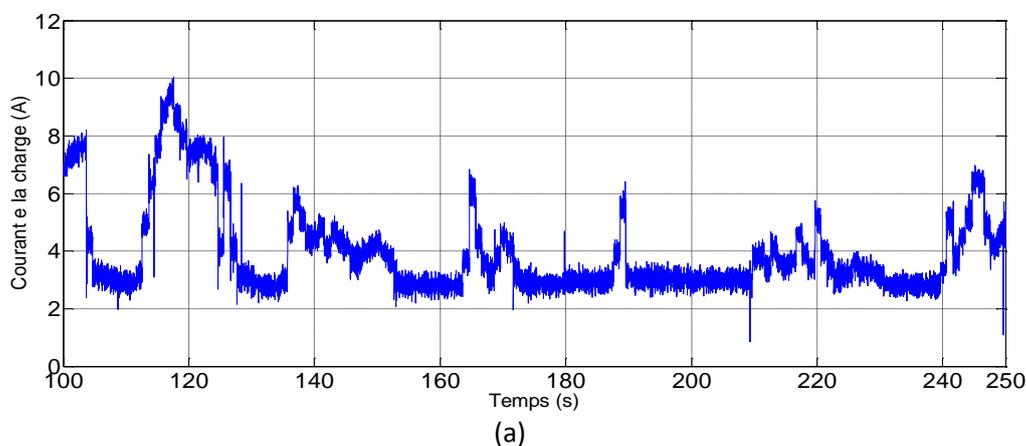


Fig.5.24. Le courant et l'état de charge du SC

L'évolution de l'état de charge et du courant du SC sont montrés dans le même graphique (Fig.5.24), cela permet de voir clairement que lorsque le SC fournit de l'énergie, ce qui correspond à un sens montant du courant, le SOC du SC diminue et vice versa. De plus, puisque le SC intervient uniquement dans les phases transitoires, son état de charge ne diminue pas beaucoup (d'où $0.73 < SOC < 0.765$).



(b)

Fig.5.25 Evolution du courant de la charge (a) tension du bus et sa référence (b).

Le courant absorbé par la charge et la tension du bus DC sont illustrés Fig.5.25. Le maintien de la tension de sortie du système (tension de bus) autour de sa référence qui est de l'ordre de 42V est montré dans la Fig.5.25(b). L'ajustement de la tension du bus DC à une valeur de 42 V se fait en ligne. Donc, on peut dire que le contrôle proposé gère efficacement l'énergie pour maintenir constante la tension du bus DC à 42V. La Fig.5.25(b) montre aussi que cette tension suit assez bien sa référence, même si cette tension fluctue mais dans une plage acceptable d'erreur statique autour de $\pm 0.2V$, ceci peut être causé par le bruit sur la mesure puisqu'il s'agit du système réel.

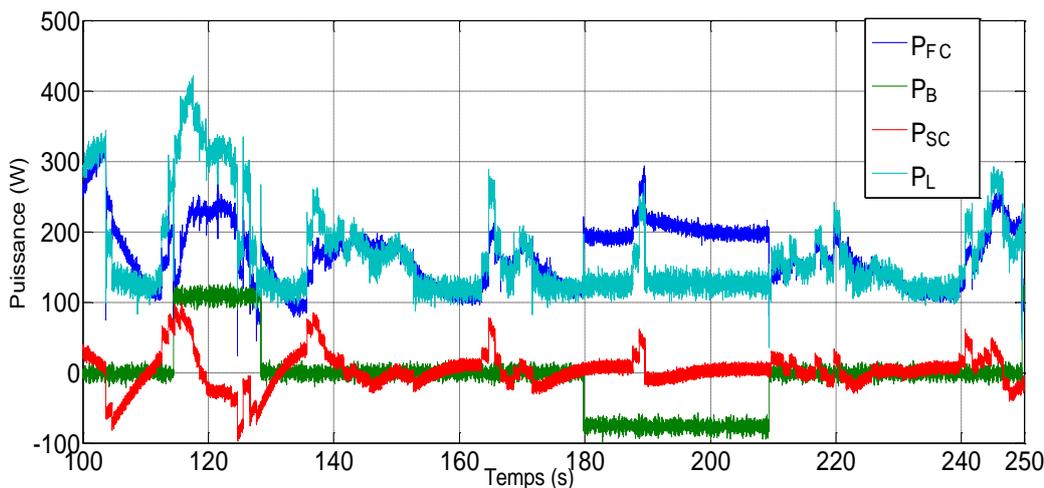


Fig.5.26 les puissances fournies par la PàC, la batterie et le SC selon la demande de la charge.

La Fig.5.26 présente un résultat significatif qui reflète le scénario proposé et qui montre le rôle de chaque source intégrée dans le système hybride. D'autre part, cette figure montre que la commande proposée gère correctement l'énergie entre les sources et le système hybride et peut satisfaire l'énergie demandée dans différents régimes en temps réel avec une réponse dynamique instantanée. On observe clairement que la PàC fournit la majorité de la puissance demandée par la charge dans le régime permanent. Ainsi, la source principale a satisfait la demande de la charge et en même temps la recharge de la batterie entre [180s – 210s] et la charge du SC entre [105s – 110s]. Tandis, que le SC réagit correctement lors des transitions de puissance. Cependant, la batterie peut compenser la différence entre la puissance demandée par la charge et la puissance fournie par la PàC en régime permanent, comme le montre la figure durant l'intervalle [110s – 130s]. Par conséquent, selon l'état de charge de la batterie, cette dernière peut aider la PàC à satisfaire la demande de la charge lorsque par exemple le niveau d'hydrogène baisse. Ce travail est publié dans IJHE [12].

5.5 Conclusion

Ce chapitre présente un travail théorique et expérimental sur la gestion d'énergie optimale pour différents systèmes hybrides, à savoir PàC/Batterie, PàC/SC et PàC/Batterie/SC. La complexité et la non linéarité des systèmes étudiés d'une part et les limitations de chaque source d'autre part, rendent difficile de trouver le contrôle qui répartit de manière intelligente le flux de puissance avec les garanties de stabilité. La nouveauté de ce travail dans ce chapitre est de combiner la méthode IDA-PBC avec l'approche HJB pour prendre en compte les contraintes de limitation des sources embarquées et déterminer la

répartition optimale de la puissance. Par conséquent, les lois de commande issues d'IDA-PBC ont pour but la poursuite d'un modèle de référence fournit par l'approche d'optimisation HJB. Cette dernière a estimé les courants de références des sources qui sont introduits par la suite dans la commande basée sur la passivité. Ce qui permet de garantir le fonctionnement et l'autonomie du véhicule électrique hybride. Dans ces systèmes, la PàC est sollicitée pour fournir la majorité de la puissance demandée en régime permanent, la batterie et/ou le SC sont utilisés dans les phases transitoires. Par ailleurs, la batterie peut être utilisée en phase permanente pour compenser la puissance manquante par la PàC. La validation expérimentale avec prise en compte des limitations des sources montre l'efficacité et la faisabilité du contrôle proposé et montre que la combinaison entre les deux approches présente de bonnes performances.

6 Chapitre 6 : Conclusions et perspectives

Cette thèse avait pour objet de fournir une étude sur les problèmes de modélisation, de gestion d'énergie et d'optimisation des véhicules hybrides à PàC pour différentes options d'hybridation du système de stockage, à savoir les batteries, les supercondensateurs ou les batteries et supercondensateurs. La stratégie de contrôle non linéaire basé sur la passivité a été appliquée pour les trois topologies. La première étape de la modélisation du système est une étape importante et nécessaire avant d'appliquer la méthode du contrôle proposée. La modélisation est considérée comme une étape centrale dans la conception de la commande. Dans ce travail de thèse, l'étape de la modélisation est basée sur des procédures où le modèle mathématique du système physique est élaboré dans une forme qui indique directement la structure physique fondamentale comme dans le cas des systèmes Hamiltoniens Commandés par Ports (PCH). Cette technique présente un grand champ d'intérêt pour la recherche des systèmes électriques, mécaniques et électromécaniques. Les systèmes PCH couvrent un grand ensemble de systèmes physiques et capturent des propriétés structurelles importantes. Dans l'étape de synthèse de la commande, le concept d'énergie est incorporé naturellement par le concept de passivité. En effet, la réécriture du modèle sous une forme PCH permet d'exhiber des propriétés physiques importantes, telles que l'interconnexion entre les différentes variables ainsi que l'identification des termes d'amortissement, qui aident à la stabilisation. La prise en compte de ces propriétés physiques permet la détermination de commandes non linéaires simples, robustes, basées sur la connaissance de la physique et nécessitant un minimum de capteurs.

Ce mémoire commence par une introduction générale où dans un premier temps la problématique énergétique est exposée permettant de montrer l'intérêt des différents systèmes hybrides à PàC et la nécessité du mix énergétique. Par la suite, le positionnement de la thèse et l'orientation des travaux de cette thèse ont été abordés afin de montrer la contribution de ce travail de thèse. La motivation qui nous guide pour le choix des applications, des méthodes de modélisation et la technique de commande et d'optimisation est présentée. Ce chapitre d'introduction se termine par la citation des articles publiés durant ce travail de thèse.

Comme la PàC ne peut pas subvenir aux dynamiques élevées de puissance, les sources de stockage d'énergie sont nécessaires pour assurer le fonctionnement du système hybride à PàC. Cependant, l'architecture des véhicules électriques hybrides à PàC avec plusieurs sources d'énergie complique l'élaboration d'une stratégie de gestion de l'énergie. Afin de faciliter la conception d'une stratégie de gestion de l'énergie, l'analyse et les caractéristiques des différentes sources d'énergie sont présentées dans le chapitre 2. Par la suite, les travaux sur la gestion d'énergie des systèmes hybrides à PàC sont passés

en revue afin de montrer les avantages et inconvénients pour les stratégies proposées par les auteurs et notamment le contrôle basé sur la passivité.

Différentes topologies de systèmes hybrides à PàC sont étudiées et modélisées dans le Chapitre 3. Ces topologies allant de système simple PàC/batterie, PàC/SC à des systèmes plus complexes PàC/Batterie/SC, avec des systèmes d'équations d'ordre différents.

Il s'est avéré que la réécriture mathématique des systèmes hybrides étudiés sous la structure PCH facilite la synthèse des lois de commande de la méthode IDA-PBC. Ce qui est l'objet du chapitre 4 et qui est le cœur de ce mémoire. En effet, Il est montré dans ce chapitre, que les choix des trajectoires d'équilibre, et le suivi des variables vers ces trajectoires, permettent une gestion efficace des flux d'énergie, ce qui est le principe de la stratégie choisie IDA-PBC. Les preuves de stabilité sont apportées. La stratégie proposée était validée en simulation et expérimentalement sur les différents bancs d'essais réalisés durant des séjours scientifiques dans des laboratoires étrangers. Il est à noter que grâce à l'approche IDA-PBC appliquée à des systèmes PCH, les expressions des commandes ont été largement simplifiées et ne nécessitent qu'un minimum de capteurs. La simplification des expressions des lois de commandes a permis un fonctionnement en temps réel.

Le chapitre 5 propose une étude et une solution complète, allant de la modélisation, la commande, la preuve de stabilité, la simulation et jusqu'à la validation pratique. De nouvelles contraintes apparaissent en prévision d'une utilisation en temps réel des systèmes hybrides à PàC. Ces contraintes et objectifs sont principalement liés aux limitations des ressources énergétiques et à la minimisation de la consommation d'hydrogène. La supervision des ressources en hydrogène et en niveau de SOC sont proposées à travers la résolution des équations d'Hamilton-Jacobi Bellman, qui donne la consigne du courant de batterie et/ou SC aux boucles de régulation. La faisabilité de cette technique d'optimisation a été validée par l'expérimentation pour différentes sources hybrides.

Perspectives

Des solutions relativement complètes et abouties ont été présentés dans ce travail de thèse destinées pour les applications véhiculaires. Tandis que d'autres solutions peuvent être améliorées et compléter ce travail de thèse. Un ensemble de perspectives peut être envisagé :

- Une étude approfondie sur des méthodes de diagnostic pour les systèmes PàC.
- Valider en simulation l'approche de la commande optimale pour les différentes topologies étudiées.
- Explorer d'autres méthodes de synthèse de lois de commande et les comparer avec la méthode IDA-PBC.

- Explorer d'autres méthodes du contrôle optimal et les comparer avec celle du HJB.
- Réaliser une étude comparative entre la simulation et l'expérimentation des approches étudiées.
- Réaliser une étude comparative des résultats de la commande IDA-PBC et la commande IDA-PBC + HJB.

Référence :

- [1] C. Dépature, "Command par inversion d'un véhicule à pile combustible et supercondensateurs," pp. 61–64, 2017.
- [2] Worldwide production of passenger cars 1998-2014 | Statistic, "Statista Inc." [Online]. Available: <http://www.statista.com/statistics/268739/%0Aproduction-of-passenger-cars-worldwide/>.
- [3] F. Odeim, J. Roes, L. Wülbeck, and A. Heinzel, "Power management optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles with experimental validation," *J. Power Sources*, vol. 252, pp. 333–343, 2014.
- [4] J. SHANG, "The role of hydrogen and fuel cells for ultra low carbon vehicles," 2014.
- [5] "produire l'hydrogène." [Online]. Available: <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-produire-lhydrogene>.
- [6] "stocker l'hydrogène." [Online]. Available: <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene>.
- [7] D. L. Greene and G. Duleep, *Status and Prospects of the Global Automotive Fuel Cell Industry and Plans for Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure*, no. June. 2013.
- [8] A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, F. Gustin, H. S. Ramadan, and S. Fukuhara, "Fault diagnosis methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1534–1543, 2017.
- [9] A. Benmouna, M. Becherif, J. Chen, H. Chen, and D. Depernet, "Interconnection and damping assignment passivity based control for fuel cell and battery vehicle: Simulation and experimentation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 39, pp. 22467–22477, 2019.
- [10] A. Benmouna and M. Becherif, "Combined passivity based control and optimal control for energy management of fuel cell/battery hybrid system," *Asian J. Control*, vol. 21, no. 4, 2019.
- [11] A. Benmouna, M. Becherif, C. Dépature, L. Boulon, and D. Depernet, "Experimental study of energy management of FC/SC hybrid system using the Passivity Based Control," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 3, pp. 1–10, 2018.
- [12] A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, C. Dépature, and L. Boulon, "Nonlinear control and optimization of hybrid electrical vehicle under sources limitation constraints," *Int. J. Hydrogen Energy*, no. xxxx, 2019.
- [13] M. Iqbal, A. Benmouna, F. Eltoumi, F. Claude, M. Becherif, and H. S. Ramadan, "Cooperative operation of parallel connected boost converters for low voltage-high power applications: An experimental approach," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 349–358, 2019.
- [14] O. Hegazy *et al.*, "An evaluation study of current and future fuel cell hybrid electric vehicles powertrains," *World Electr. Veh. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 464–475, 2013.
- [15] F. Mohammadi, "Electric Vehicle Battery Market Analysis : Lead Acid," no. August 2018, 2019.
- [16] A. Noel and X. Leo, "Fuel cell electric vehicles: The genesis of a new era or myth-busting vehicle technology?," *transport-news*. [Online]. Available: <https://www.openaccessgovernment.org/vehicle-technology/52116/>.
- [17] S. Deb, K. Tammi, K. Kalita, and P. Mahanta, "Impact of electric vehicle charging station load on distribution network," *Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 1–25, 2018.
- [18] H. Chen, X. Zhao, T. Zhang, and P. Pei, "The reactant starvation of the proton exchange membrane fuel cells for vehicular applications: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 182, no. December 2018, pp. 282–298, 2019.
- [19] A. Florescu, S. Bacha, I. Munteanu, A. Iuliana, and A. Rumeau, "Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 280, pp. 410–421, 2015.

- [20] L. Kouchachvili, W. Yaïci, and E. Entchev, "Hybrid battery / supercapacitor energy storage system for the electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 374, no. November 2017, pp. 237–248, 2018.
- [21] P. M. Muñoz, G. Correa, M. E. Gaudiano, and D. Fernández, "Energy management control design for fuel cell hybrid electric vehicles using neural networks," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 48, pp. 28932–28944, 2017.
- [22] Z. Mokrani, D. Rekioua, N. Mebarki, T. Rekioua, and S. Bacha, "Proposed energy management strategy in electric vehicle for recovering power excess produced by fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19556–19575, 2017.
- [23] Y. Han, Q. Li, T. Wang, W. Chen, and L. Ma, "Multisource coordination energy management strategy based on SOC consensus for a PEMFC-battery-supercapacitor hybrid tramway," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 1, pp. 296–305, 2018.
- [24] S. J. Moura, J. B. Siegel, D. J. Siegel, H. K. Fathy, and A. G. Stefanopoulou, "Education on vehicle electrification: Battery systems, fuel cells, and hydrogen," *2010 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2010*, pp. 1–6, 2010.
- [25] A. Rousseau, P. Sharer, and R. Ahluwalia, "Energy storage requirements for fuel cell vehicles," *SAE Tech. Pap.*, 2004.
- [26] T. Fletcher, "Optimal energy management strategy for a fuel cell hybrid electric vehicle," 2017.
- [27] C. Xia and C. Zhang, "Power management strategy of hybrid electric vehicles based on quadratic performance index," *Energies*, vol. 8, no. 11, pp. 12458–12473, 2015.
- [28] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel cell systems explained*. 2003.
- [29] G. Pede, A. Iacobazzi, S. Passerini, A. Bobbio, and G. Botto, "FC vehicle hybridisation: An affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train," *J. Power Sources*, vol. 125, no. 2, pp. 280–291, 2004.
- [30] S. Fukuhara, Y. Ait-Amirat, and M. Becherif, "Efficiency Optimization and Anode Water Management Using Anode Purging," *2015 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2015 - Proc.*, no. 1, pp. 1–6, 2015.
- [31] a Kirubakaran, S. Jain, and R. K. Nema, "The PEM Fuel Cell System with DC/DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation," *Int. J. Recent Trends Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 157–161, 2009.
- [32] G. Electricque, "Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors," *Ph.D. Diss.*, 2007.
- [33] "Souleman Njoya Motapon 2013," *PhD Thesis*, 2013.
- [34] T. M. Padovani, "Loi de gestion d' énergie embarquée pour véhicules hybrides : approche multi-objectif et modulaire," 2016.
- [35] A. Saadi, M. Becherif, A. Aboubou, and M. Y. Ayad, "Comparison of proton exchange membrane fuel cell static models," *Renew. Energy*, vol. 56, pp. 64–71, 2013.
- [36] M. Becherif, A. Saadi, D. Hissel, A. Aboubou, and M. Y. Ayad, "Static and dynamic proton exchange membrane fuel cell models," *J. Hydrocarb. Mines Environ. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. xx–xx, 2011.
- [37] S. Pasricha, M. Keppler, S. R. Shaw, and M. H. Nehrir, "Comparison and identification of static electrical terminal fuel cell models," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 3, pp. 746–754, 2007.
- [38] B. J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, "Avoid fuel cell oxygen starvation with air flow controllers," *IEEE Control Syst. Mag.*, no. April, pp. 30–46, 2004.
- [39] S. Jemeï, "par Réseaux de Neurones To cite this version : Modélisation d' une PàC de type PEM par réseaux de neurones," 2004.

- [40] W. Friede, S. Raël, and B. Davat, "Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1234–1241, 2004.
- [41] X. Kong, A. M. Khambadkone, and S. K. Thum, "A hybrid model with combined steady-state and dynamic characteristics of PEMFC fuel cell stack," *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, vol. 3, pp. 1618–1625, 2005.
- [42] K. Stanton and J. S. Lai, "A thermally dependent fuel cell model for power electronics design," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 2005, pp. 1647–1651, 2005.
- [43] K. P. Adzakpa, K. Agbossou, Y. Dubé, M. Dostie, M. Fournier, and A. Poulin, "PEM fuel cells modeling and analysis through current and voltage transient behaviors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 581–591, 2008.
- [44] J. Garnier *et al.*, "Dynamic PEM fuel cell modeling for automotive applications," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 58, no. 5, pp. 3284–3288, 2003.
- [45] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained, Second Edition*, Wiley Onli. .
- [46] Jay Tawee Pukrushpan, "Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors," 2003.
- [47] J. T. Pukrushpan, H. Peng, and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems," *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME*, vol. 126, no. 1, pp. 14–25, 2004.
- [48] G. Alface, J. C. Ferreira, and R. Pereira, "Electric vehicle charging process and parking guidance app," *Energies*, vol. 12, no. 11, pp. 1–16, 2019.
- [49] F. Namiki, T. Maeshima, K. Inoue, H. Kawai, S. Saibara, and T. Nanto, "Lithium-ion battery for HEVs, PHEVs, and EVs," *Hitachi Rev.*, vol. 63, no. 2, pp. 103–108, 2014.
- [50] L. Claude, "Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides," 2015.
- [51] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," *J. Power Sources*, vol. 241, pp. 680–689, 2013.
- [52] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries / supercondensateurs," 2014.
- [53] L. BOULON, "Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides. Approche systémique pour la gestion d'énergie," 2009.
- [54] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system Supercapacitors as an energy storage for fuel cell automotive hybrid electrical system," *n Proc. 1st Eur. Symp. Supercap. Appl. (ESSCAP'04), Belfort*.
- [55] K. Mensah-Darkwa, C. Zequine, P. K. Kahol, and R. K. Gupta, "Supercapacitor energy storage device using biowastes: A sustainable approach to green energy," *Sustain.*, vol. 11, no. 2, 2019.
- [56] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, "Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 12, pp. 4791–4804, 2013.
- [57] Q. Li, W. Chen, Z. Liu, M. Li, and L. Ma, "Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway," *J. Power Sources*, vol. 279, pp. 267–280, 2015.
- [58] R. Ortega, F. Member, and A. Sasongko, "Energy Management of Fuel Cell / Battery / Supercapacitor Hybrid Power Sources Using Model Predictive Control," vol. 10, no. 4, pp. 1992–2002, 2014.

- [59] Z. Song, J. Li, J. Hou, H. Hofmann, M. Ouyang, and J. Du, "The Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications : A Case Study," *Energy*, 2018.
- [60] M. Hilairet, M. Ghanes, O. Béthoux, V. Tanasa, J. P. Barbot, and D. Normand-Cyrot, "A passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system," *Control Eng. Pract.*, vol. 21, no. 8, pp. 1097–1109, 2013.
- [61] P. A. Combustible, E. T. Des, and S. Micro, "CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE To cite this version : HAL Id : tel-00083105," 2006.
- [62] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N'Diaye, and A. Djerdir, "Power switch failures tolerance and remedial strategies of a 4-leg floating interleaved DC/DC boost converter for photovoltaic/fuel cell applications," *Renew. Energy*, vol. 90, pp. 14–27, 2016.
- [63] M. Hilairet, O. Béthoux, M. Ghanes, V. Tanasa, J. P. Barbot, and M. D. Normand-Cyrot, "Experimental validation of a sampled-data passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 5187–5194, 2015.
- [64] H. Aouzellag, K. Ghedamsi, and D. Aouzellag, "Energy management and fault tolerant control strategies for fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicles to enhance autonomy, efficiency and life time of the fuel cell system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 22, pp. 7204–7213, 2015.
- [65] B. Vural *et al.*, "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11161–11171, 2010.
- [66] P. Keil, M. Englberger, and A. Jossen, "Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles: An Experimental Analysis of Performance Improvements at Subzero Temperatures," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 3, pp. 998–1006, 2016.
- [67] A. Tofighi and M. Kalantar, "Adaptive passivity-based control of PEM fuel cell/battery hybrid power source," *Przełł...d Elektrotechniczny*, no. 4, pp. 164–171, 2011.
- [68] A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock, and P. A. Wilson, "An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 47, pp. 22453–22464, 2016.
- [69] C. E. Thomas, "Fuel cell and battery electric vehicles compared," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 15, pp. 6005–6020, 2009.
- [70] N. Marx, D. Hissel, F. Gustin, L. Boulon, and K. Agbossou, "On the sizing and energy management of an hybrid multistack fuel cell – Battery system for automotive applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–9, 2016.
- [71] B. Dakyo and H. Gualous, "Supercapacitors and Battery Energy Management Based on New European Driving Cycle," *J. Energy Power Eng.*, vol. 6, pp. 168–177, 2012.
- [72] Y. Zhou *et al.*, "High performance supercapacitor under extremely low environmental temperature," *RSC Adv.*, vol. 5, no. 88, pp. 71699–71703, 2015.
- [73] R. Vellacheri, A. Al-Haddad, H. Zhao, W. Wang, C. Wang, and Y. Lei, "High performance supercapacitor for efficient energy storage under extreme environmental temperatures," *Nano Energy*, vol. 8, pp. 231–237, 2014.
- [74] R. Karangia, M. Jadeja, C. Upadhyay, and H. Chandwani, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system used in Electric Vehicle," *2013 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2013*, pp. 688–691, 2013.
- [75] Z. Yu, D. Zinger, and A. Bose, "An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351–2359, 2011.

- [76] N. Sulaiman, M. A. Hannan, A. Mohamed, E. H. Majlan, and W. R. Wan Daud, "A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 802–814, 2015.
- [77] M. A. Hannan, F. A. Azidin, and A. Mohamed, "Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles," *Energy Convers. Manag.*, vol. 62, pp. 123–130, 2012.
- [78] M. Tanrioven and M. S. Alam, "Reliability modeling and analysis of stand-alone PEM fuel cell power plants," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 7, pp. 915–933, 2006.
- [79] Z. Yu, D. Zinger, and A. Bose, "An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 2351–2359, 2011.
- [80] C. Zhao, H. Yin, and C. Ma, "Two-level energy management strategy for a fuel cell-battery-ultracapacitor hybrid system," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2016.
- [81] A. Panday and H. O. Bansal, "Energy management in hybrid electric vehicles using particle swarm optimization method," *2016 IEEE 7th Power India Int. Conf. PIICON 2016*, no. May, 2017.
- [82] K. Ettahir, L. Boulon, and K. Agbossou, "Optimization-based energy management strategy for a fuel cell/battery hybrid power system," *Appl. Energy*, vol. 163, no. February, pp. 142–153, 2016.
- [83] H. Yu, F. Castelli-Dezza, and F. Cheli, "Multi-objective Optimal Sizing and Energy Management of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles," pp. 1–10, 2018.
- [84] Z. Hong, Q. Li, Y. Han, W. Shang, Y. Zhu, and W. Chen, "An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 6, pp. 3261–3272, 2018.
- [85] J. Snoussi, S. Ben Elghali, M. Benbouzid, and M. F. Mimouni, "Auto-adaptive filtering-based energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles," *Energies*, vol. 11, no. 8, 2018.
- [86] J. P. Torreglosa and L. M. Ferna, "Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy," vol. 7, 2012.
- [87] I. E. Aiteur, C. Vlad, and E. Godoy, "Energy management and control of a fuel cell/supercapacitor multi-source system for electric vehicles," *2015 19th Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput. ICSTCC 2015 - Jt. Conf. SINTES 19, SACCs 15, SIMSIS 19*, pp. 797–802, 2015.
- [88] H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, "Combination of Markov chain and optimal control solved by Pontryagin's Minimum Principle for a fuel cell / supercapacitor vehicle," *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 387–393, 2015.
- [89] C. Sandoval, V. M. Alvarado, J. C. Carmona, G. Lopez Lopez, and J. F. Gomez-Aguilar, "Energy management control strategy to improve the FC/SC dynamic behavior on hybrid electric vehicles: A frequency based distribution," *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 407–418, 2017.
- [90] X. Zhang, L. Liu, Y. Dai, and T. Lu, "Experimental investigation on the online fuzzy energy management of hybrid fuel cell/battery power system for UAVs," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 21, pp. 10094–10103, 2018.
- [91] M. Mordjaoui, S. Haddad, A. Medoued, and A. Laouafi, "Electric load forecasting by using dynamic neural network," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17655–17663, 2017.
- [92] T. B. P. Pierfederici, S. Martin, J. Hinaje, and M. Davat, "Modeling and Control of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Source Based on Differential Flatness Control," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2010.
- [93] E. Tazelaar, *Energy Management and Sizing of Fuel Cell Hybrid Propulsion Systems*, no. 2013. 2013.

- [94] P. Borja, R. Cisneros, and R. Ortega, "A constructive procedure for energy shaping of port—Hamiltonian systems," *Automatica*, vol. 72, pp. 230–234, 2016.
- [95] A. Loria and H. Nijmeijer, "Passivity in Control Systems," *Control Syst. Robot. Autom.*, vol. 13, pp. 1–24.
- [96] F. Casta and R. Ortega, "Passivity-Based Control Control Is Equivalent to Dissipation and To Output Invariance Dissipation And Output Invariance," pp. 4707–4714, 2009.
- [97] D. Hill, J. Zhao, R. G. Utdallas, and R. O. Lss, "20 Years of Passivity – Based Control (PBC): Theory and Applications," *Decis. Control*, pp. 1–85, 2009.
- [98] M. Becherif and E. Mendes, "Stability And Robustness Of Disturbed-Port Controlled Hamiltonian Systems With Dissipation," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 38, no. 1, pp. 574–579, Jan. 2005.
- [99] M. Hilairet, M. Ghanes, O. Béthoux, V. Tanasa, J.-P. Barbot, and D. Normand-Cyrot, "A passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system," *Control Eng. Pract.*, vol. 21, no. 8, pp. 1097–1109, Aug. 2013.
- [100] A. Benmouna, M. Becherif, D. Depernet, and M. A. Ebrahim, "Novel Energy Management Technique for Hybrid Electric Vehicle via Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control," *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 116–128, 2018.
- [101] C. Appel, "Fo r R iew On Fo r R iew On ly," 2017.
- [102] R. Saadi *et al.*, "Energy management of fuel cell/ supercapacitor hybrid power sources based on the flatness control," *Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, no. May, pp. 128–133, 2013.
- [103] M. Becherif, "Passivity-based control of hybrid sources: Fuel cell and battery," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 11, no. PART 1, pp. 585–590, 2006.
- [104] M. Y. Ayad, M. Becherif, A. Henni, A. Aboubou, M. Wack, and S. Laghrouche, "Passivity-Based Control applied to DC hybrid power source using fuel cell and supercapacitors," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 7, pp. 1468–1475, 2010.
- [105] S. Mane, F. Kazi, and N. M. Singh, "Fuel cell and ultra-capacitor based hybrid energy control using IDA-PBC methodology," *2015 Int. Conf. Ind. Instrum. Control. ICIC 2015*, no. Icic, pp. 879–884, 2015.
- [106] C. Geng, X. Jin, and X. Zhang, "Simulation research on a novel control strategy for fuel cell extended-range vehicles," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 408–420, 2019.
- [107] S. C. Olteanu *et al.*, "Embedded P . E . M . fuel cell stack nonlinear observer by means of a Takagi-Sugeno approach To cite this version : HAL Id : hal-01248947 Embedded P . E . M . fuel cell stack nonlinear observer by means of a Takagi-Sugeno approach," 2015.
- [108] P. Thounthong, S. Raël, and B. Davat, "Energy management of fuel cell / battery / supercapacitor hybrid power source for vehicle applications," *J. Power Sources*, vol. 193, pp. 376–385, 2009.
- [109] X. Hu, L. Johannesson, N. Murgovski, and B. Egardt, "Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 913–924, 2015.
- [110] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [111] Marcos GARCIA ARREGUI, "Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors.," Universidad Pública de Navarra Theoretical, 2007.
- [112] O. Erdinc and M. Uzunoglu, "Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of

- application areas, design architectures and energy management approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2874–2884, 2010.
- [113] L. S. Xavier, W. C. S. Amorim, A. F. Cupertino, V. F. Mendes, W. C. do Boaventura, and H. A. Pereira, "Power converters for battery energy storage systems connected to medium voltage systems: a comprehensive review," *BMC Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, 2019.
- [114] F. B. U. Vehicles, J. Bauman, S. Member, M. Kazerani, and S. Member, "A Comparative Study of Fuel-Cell – Battery," *Comp. Gen. Pharmacol.*, vol. 57, no. 2, pp. 760–769, 2008.
- [115] H. Ramírez, D. Sbarbaro, and R. Ortega, "On the control of non-linear processes: An IDA-PBC approach," *J. Process Control*, vol. 19, no. 3, pp. 405–414, 2009.
- [116] R. Ortega and E. Garcíá-Canseco, "Interconnection and Damping Assignment Passivity-Based Control: A Survey," *Eur. J. Control*, vol. 10, no. February, pp. 432–450, 2004.
- [117] R. Ortega, A. van der Schaft, B. Maschke, and G. Escobar, "Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems," *Automatica*, vol. 38, no. 4, pp. 585–596, 2002.
- [118] C. Musardo, G. Rizzoni, Y. Guezennec, and B. Staccia, "A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management," *Eur. J. Control*, vol. 11, no. 4–5, pp. 509–524, 2005.
- [119] Z. Hong, Q. Li, Y. Han, W. Shang, Y. Zhu, and W. Chen, "An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 6, pp. 3261–3272, 2018.
- [120] P. Thounthong, "CONCEPTION D'UNE SOURCE HYBRIDE UTILISANT UNE PILE A COMBUSTIBLE ET DES SUPERCONDENSATEURS," Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [121] E. Tazelaar, *Energy Management and Sizing of Fuel Cell Hybrid Propulsion Systems*, no. 2013. 2013.
- [122] S. Chakraborty, H. N. Vu, M. M. Hasan, D. D. Tran, M. El Baghdadi, and O. Hegazy, "DC-DC converter topologies for electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and fast charging stations: State of the art and future trends," *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019.
- [123] M. S. Ali, S. K. Kamarudin, M. S. Masdar, and A. Mohamed, "An overview of power electronics applications in fuel cell systems: DC and AC converters," *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014.
- [124] O. Kraa, H. Ghodbane, M. Y. Ayad, M. Becherif, A. Aboubou, and M. Bahri, "Energy Management of Fuel Cell/ Supercapacitor Hybrid Source Based on Linear and Sliding Mode Control," *Energy Procedia*, vol. 74, no. 0, pp. 1258–1264, 2015.
- [125] W. Wu, J. Partridge, and R. Bucknall, "Development and evaluation of a degree of hybridisation identification strategy for a fuel cell supercapacitor hybrid bus," *Energies*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [126] Q. Li, T. Wang, C. Dai, W. Chen, and L. Ma, "Power Management Strategy based on Adaptive Droop Control for a Fuel Cell-Battery-Supercapacitor Hybrid Tramway," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 9545, no. c, 2017.
- [127] J. Han *et al.*, "An Energy Management System of a Fuel Cell / Battery Hybrid Boat To cite this version : HAL Id : hal-01072101 Science Arts & Métiers (SAM)," 2015.
- [128] L. Gauchia, A. Bouscayrol, J. Sanz, R. Trigui, and P. Barrade, "Fuel cell, battery and supercapacitor hybrid system for electric vehicle: Modeling and control via energetic macroscopic representation," *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2011*, 2011.
- [129] M. Becherif and M. Y. Ayad, "Advantages of variable DC bus voltage for Hybrid Electrical vehicle," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010*, 2010.
- [130] A. Astolfi and T. Vergata, "Control by Interconnection and Standard Passivity – Based Control of Port –

- Hamiltonian Systems,” 2007.
- [131] G. M. Williams, M. Compton, D. a Ramirez, M. M. Hayat, and A. S. Huntington, “IE Pr E oo f Pr E oo f,” vol. 73, pp. 1–16, 2013.
- [132] “Nonlinear Control Systems By,” 2011.
- [133] M. I. El-Hawwary, “PI Passivity-Based Control : Application to Physical Systems,” University of Toronto, 2016.
- [134] M. Ryalat and D. S. Laila, “A simplified IDA-PBC design for underactuated mechanical systems with applications,” *Eur. J. Control*, vol. 27, no. January, pp. 1–16, 2016.
- [135] C. A. Desoer and M. Vidyasagar, “Feedback Systems: Input-Output Properties,” *Acad. Press*, 1975.
- [136] J. R. Forbes, “Extensions of input-output stability theory and the control of aerospace systems,” 2011.
- [137] J. C. Willems, “Dissipative dynamical systems part i: General theory,” *Arch. Ration. Mech. Anal.*, vol. 45, pp. 321 – 350, 1972.
- [138] T. Kloiber, “Constructive Passivity-Based Control of Smooth and Switched Nonlinear Systems,” 2014.
- [139] L. Rifford, “Existence of Lipschitz and semi-concave control Lyapunov functions,” *SIAM J. Control Optim.*, vol. 41, no. 3, pp. 659–681, 2000.
- [140] S. I. Seleme, L. M. F. Morais, A. H. R. Rosa, and L. A. B. Torres, “Stability in passivity-based boost converter controller for power factor correction,” *Eur. J. Control*, vol. 19, no. 1, pp. 56–64, 2013.
- [141] R. Ortega, A. J. Van der Schaft, I. Mareels, and B. Maschke, “Putting energy back in control,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 21, no. 2, pp. 18–33, 2001.
- [142] F. Castañós, “Cyclo Passivité et Commande par Interconnexion,” p. 148, 2009.
- [143] A. J. Van Der Schaft and B. M. Maschke, “Port-Hamiltonian systems : a theory for modeling , simulation and control of complex physical systems,” pp. 1–37, 2003.
- [144] A. J. Van der Schaft, *L2-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*, Springer-V. 2000.
- [145] A. Van Der Schaft and D. Jeltsema, *Port-Hamiltonian systems theory: An introductory overview*, vol. 1, no. 2–3. 2014.
- [146] A. Macchelli and C. Melchiorri, “Control by interconnection of mixed port Hamiltonian systems,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 50, no. 11, pp. 1839–1844, 2005.
- [147] R. Ortega, “ENERGY – SHAPING STABILIZATION OF DYNAMICAL SYSTEMS Romeo Ortega and Elo ´,” 2003.
- [148] R. Ortega, A. van der Schaft, F. Castañós, and A. Astolfi, “Control by interconnection and standard passivity-based control of port-hamiltonian systems,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 53, no. 11, pp. 2527–2542, 2008.
- [149] R. Ortega and I. Mareels, “Energy-Balancing Passivity-Based Control,” no. June, pp. 1265–1270, 2000.
- [150] K. Nunna, M. Sassano, and A. Astolfi, “Constructive Interconnection and Damping Assignment for Port-Controlled Hamiltonian Systems,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 60, no. 9, pp. 2350–2361, 2015.
- [151] B. Hamroun *et al.*, “Control by Interconnection and Energy-Shaping Methods of Port Hamiltonian Models . Application to the Shallow Water Equations To cite this version : HAL Id : hal-01625065 Control by Interconnection and Energy Shaping Methods of Port Hamiltonian Models - A,” 2017.
- [152] V. Duindam, A. Macchelli, S. Stramigioli, and H. Bruyninckx, *Modeling and control of complex physical systems: The port-hamiltonian approach*. 2009.

- [153] M. Becherif and E. Mendes, "Stability and robustness disturbed-port controlled hamiltonian system with dissipation motor," in *16th IFAC World Congress, Prague, ., 2005*.
- [154] R. Ortega and P. J. Nicklasson, *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems : Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications*, 1st ed. 1998.
- [155] V. Der Schaft, "University of Groningen Putting Energy Back in Control Ortega, Romeo; van der Schaft, Abraham; Mareels, Iven; Maschke, Bernhard," 2001.
- [156] A. . van der S. A. ASTOLFI, F. GORDILLO, *IAGRAGIAN AND HAMILTONIAN METHODS FOR NONLINEAR CONTROL 2003*. 2003.
- [157] A. Kebairi, "Modélisation, identification et commandes non linéaires d'actionneurs mécatroniques de la boucle d'air d'un moteur diesel," Université, De Curie, Marie Vi, Paris, 2006.
- [158] D. Zonetti, "Energy-based modelling and control of electric power systems with guaranteed stability properties," 2016.
- [159] 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 multi-physique Tedjani Mesbahi To cite this version : HAL Id : tel-01334059 Influence des stratégies," 2017.
- [160] A. Florescu, "Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique," *Thèse Dr. Univ. Grenoble*, 2012.
- [161] M.-E. Choi, J.-S. Lee, and S.-W. Seo, "Real-time Optimization for Power Management Systems of a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 3600–3611, 2014.
- [162] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, "Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 11, pp. 9368–9382, 2012.
- [163] B. G. Michel P, Charlet A, Colin G, Chamaillard Y, Nouillant C, "Energy management of HEV to optimize fuel consumption and pollutant emissions," *11th Int. Symp. Adv. Veh. Control. AVEC'12, Sep 2012, Seoul, South Korea*, no. 2012, pp. 1–6, 2012.
- [164] M. C. Pera, D. Hissel, and J. M. Kauffmann, "Fuel cell systems for electrical vehicles," *Veh. Technol. Conf. IEEE 55th Veh. Technol. Conf. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)*, vol. 4, pp. 2097–2102, 2002.
- [165] L. Wang, Y. Hung, and J. Li, "Comparison of Passive and Active Types of Proton Exchange Membrane Fuel Cell / Battery HEV s," pp. 509–514, 2015.
- [166] A. Khaligh, S. Member, and Z. Li, "Battery , Ultracapacitor , Fuel Cell , and Hybrid Energy Storage Systems for Electric , Hybrid Electric , Fuel Cell , and Plug-In Hybrid Electric Vehicles : State of the Art," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [167] J. Zhu, *A feedback optimal control by Hamilton–Jacobi–Bellman equation*, vol. 37. Elsevier Ltd, p. 70–74.
- [168] B. Moulik and D. Söffker, "Optimal rule-based power management for online, real-time applications in hevs with multiple sources and objectives: A review," *Energies*, vol. 8, no. 9, pp. 9049–9063, 2015.
- [169] M. N. Sid, K. Marouani, M. Becherif, and H. Alloui, "Optimal Energy Management Control Scheme for Fuel cell Hybrid Vehicle," in *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) UnSersity of Palermo. June 16-19, 2014. Palermo, Italy Optimal*, 2014.
- [170] N. Kim, S. Ha, J. Jeong, and S. W. Cha, "Sufficient conditions for optimal energy management strategies of fuel cell hybrid electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J.*

Automob. Eng., vol. 230, no. 2, pp. 1–13, 2015.

- [171] H. Li, A. Ravey, A. N'Diaye, and A. Djerdir, "A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor," *J. Power Sources*, vol. 395, no. May, pp. 262–270, 2018.
- [172] A. Kheirandish, F. Motlagh, N. Shafiabady, and M. Dahari, "Dynamic modelling of PEM fuel cell of power electric bicycle system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 22, pp. 9585–9594, 2016.
- [173] P. Garcia, J. P. Torreglosa, L. M. Fernandez, and F. Jurado, "Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 12, pp. 4791–4804, 2013.
- [174] R. I. C. D. Orf, *PEM Fuel Cells : Theory and Practice A CADEMIC P RESS Series S ERIES E DITOR*. Elsevier Academic Press, 2005.
- [175] Z. Chen, R. Xiong, K. Wang, and B. Jiao, "Optimal energy management strategy of a plug-in hybrid electric vehicle based on a particle swarm optimization algorithm," *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 3661–3678, 2015.
- [176] A. P. Sage, *Optimum Systems Control*, 2nd editio. 1977.
- [177] A. Benmouna and M. Becherif, "Combined passivity based control and optimal control for energy management of fuel cell/battery hybrid system," *Asian J. Control*, 2019.

Titre : Gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées

Mots clés : gestion d'énergie, IDA-PBC, véhicule électrique, HJB, contrôle non linéaire

Resumé: Ce sujet de thèse porte sur l'étude de la gestion énergétique reconfigurable d'un véhicule électrique basée sur l'identification en ligne des sources embarquées. Ces dernières années, la gestion d'énergie d'un système hybride pour les applications automobiles a fait l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche. Dans cette étude, la chaîne énergétique considérée se constitue d'une pile à combustible comme source principale, de sources de stockage à savoir les batteries et/ou les supercondensateurs, de convertisseurs pour chaque source et enfin d'une charge émulant la demande en puissance. En effet, le problème qui se pose dans les systèmes hybrides est de trouver une stratégie permettant une meilleure répartition de la puissance électrique entre les différentes sources embarquées, ce qui constitue l'apport de ce travail de recherche. Ainsi que de définir des lois de gestion énergétique en considérant des mesures faites en temps réel dans le but d'augmenter la durée de vie et la fiabilité des sources d'une part, et la disponibilité du véhicule électrique d'autre part. Dans ce travail de thèse, le contrôle non linéaire nommé IDA-PBC (Interconnection and Damping assignment-Passivity Based Control) est utilisé avec la structure PCH (Port Controlled Hamiltonian) qui permet de présenter des propriétés structurelles du système à savoir l'énergie totale du système, l'amortissement et les interconnexions d'états. La méthode IDA-PBC est une technique non linéaire puissante, elle est considérée comme un moyen général pour stabiliser une grande classe de systèmes physiques. Dans une seconde partie de ce travail, une stratégie de gestion de l'énergie optimale est proposée pour le système hybride étudié qui est la combinaison entre l'IDA-PBC et la méthode d'Hamiltonian Jacobi Bellman. La preuve de stabilité est donnée et l'efficacité de la stratégie proposée est démontrée. Plusieurs validations expérimentales valident ce travail

Title: Reconfigurable energy management of an electric vehicle based on online identification of embedded sources.

Keywords: energy management, IDA-PBC, electrical vehicle, HJB, nonlinear control

This thesis deals with the study of the reconfigurable energy management of an electric vehicle based on the online identification of embedded sources. In recent years, the energy management of a hybrid system for automotive applications has been the subject of a great number of researches. In this study, the energy chain considered consists of a fuel cell as the main source, storage sources such as batteries and/or supercapacitors, converters for each source and finally a load emulating the power demand. Indeed, the problem in hybrid systems is to find a strategy for a better distribution of electrical power between the different embedded sources, which is the added value of this research work. As well as defining energy management laws by considering real-time measurements in order to increase the lifespan and reliability of sources on the one hand, and the availability of the electric vehicle on the other hand. In this thesis, the nonlinear control called IDA-PBC (Interconnection and Damping Assignment-Passivity Based Control) is used with the PCH (Port Controlled Hamiltonian) structure which allows to present structural properties of the system namely total system energy, damping and state interconnections. The IDA-PBC method is a powerful nonlinear technique, it is considered as a general means to stabilize a large class of physical systems. In a second part of this work, an optimal energy management strategy is proposed for the hybrid system under study, which is the combination of IDA-PBC and Hamiltonian's Jacobi Bellman method. Proof of stability is provided and the effectiveness of the proposed strategy is demonstrated. Several experimental validations are presented